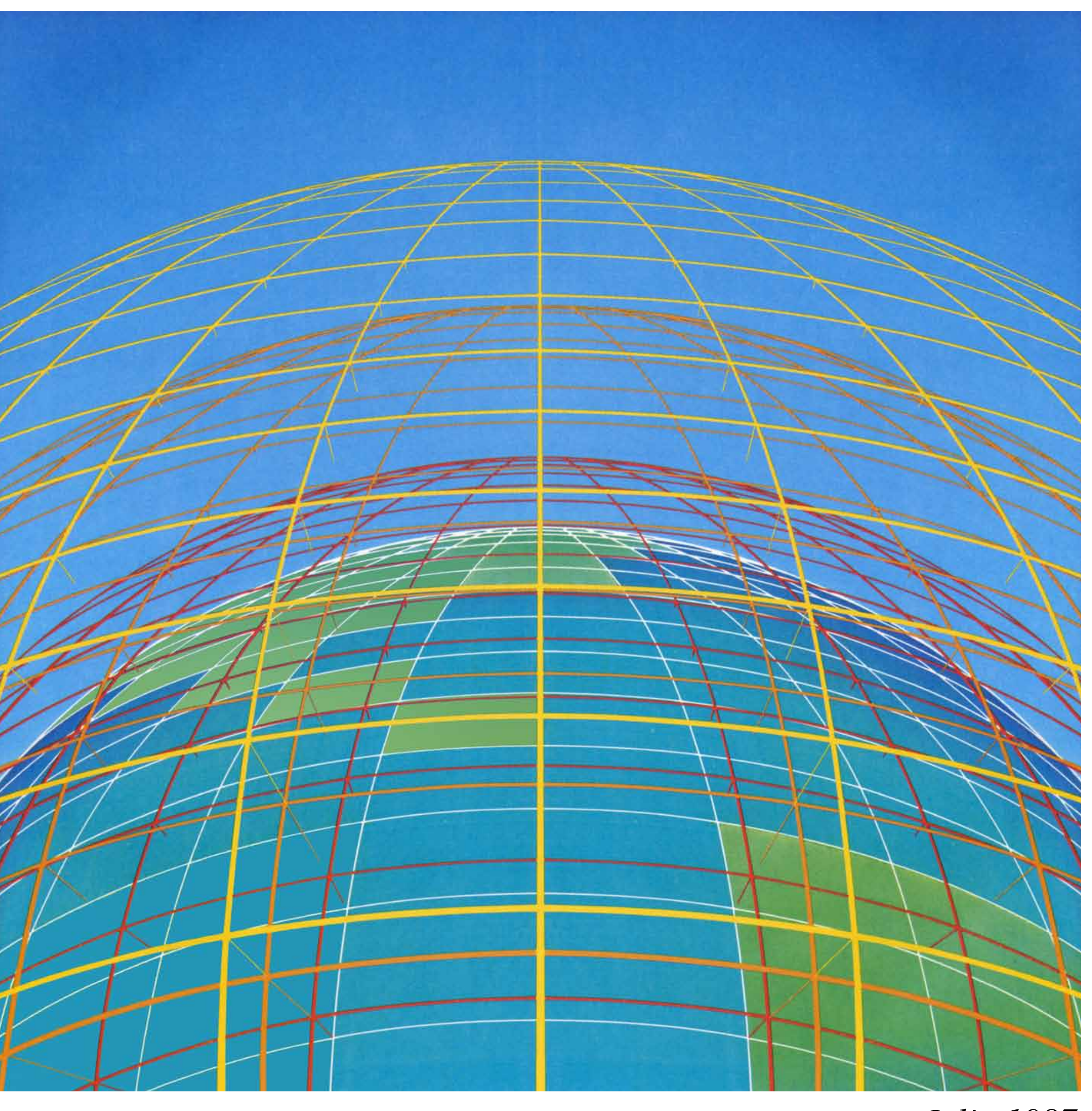
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



PREDICCION DEL CLIMA

Julio 1987

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 130
Julio 1987



INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

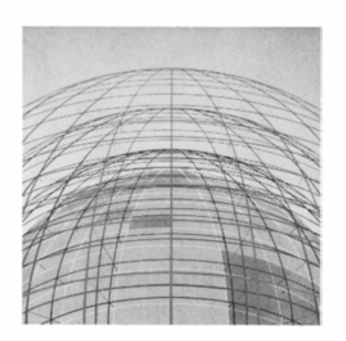
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Síntesis cósmica de litio, berilio y boro*; Juan Luis Serra Ferrer: *Sinapsis que computan el movimiento*; Manuel Puigcerver: *Modelos climáticos*; Antonia Martín Hidalgo y Emilio Herrera Castillón: *Glucosa y envejecimiento*; Amando García Rodríguez: *La reaparición de fases*; Josep Enric Llebot Rabagliatti: *Detonación de explosivos*; Joandomènec Ros Aragonés: *Simbiosis en las profundidades marinas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Eugenio Portela, José-Luis Pérez-Cirera y Carlos Sánchez del Río



PORTADA

La portada representa parte de la "malla" tridimensional empleada por un modelo informático avanzado del clima terrestre (véase "Modelos climáticos", por Stephen H. Schneider, en este mismo número). Como se tardaría muchísimo tiempo en determinar la temperatura, la humedad y otras variables climáticas en todos los puntos de la atmósfera, el ordenador hace los cálculos solamente en ciertos puntos seleccionados: los nudos, o intersecciones imaginarias de las líneas horizontales y verticales que constituyen la malla. El modelo "ve" los detalles geográficos con la misma resolución, de modo que su mapa mundial es muy tosco; la vista está enfocada en América Central.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de la portada por Andrew Christie

Página	Fuente
11-12	M. Barón, A. Chueca y J. López-Gorgé
13-17	M. Barón, A. Chueca, J. López-Gorgé y Ricardo Génova
18	Observatorio Nacional de Kitt Peak
20	Gabor Kiss
21	James Kilkelly (*arriba*) Gabor Kiss (*abajo*)
22-24	Gabor Kiss
29	Frank R. Amthor, Clyde W. Oyster y Ellen S. Takahaski, Universidad de Alabama
30-33	Alan D. Iselin
34	James Kilkelly
41	Starley L. Thompson, Centro Nacional para la Investigación Atmosférica
42-47	Andrew Christie
53	David M. Phillips, The Population Council
54-55	Sally Black
56	Christine McBride y David E. Birk, Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey, Robert Wood Johnson Medical School, Piscataway
57	Carol Donner
58-59	Sally Black
61	Christopher M. Sorensen, Universidad Estatal de Kansas
62-67	George V. Kelvin, Science Graphics
71	Laboratorio de Física computacional del Laboratorio de Investigación Naval
72-74	Hank Iken
75	Laboratorio Nacional de Los Alamos
76	LeRoy N. Sánchez, Laboratorio Nacional de Los Alamos
79	R. R. Hessler, Institución Scripps de Oceanografía
80	Tom Prentiss
81-82	Patricia J. Wynne
83	Charles R. Fisher, Jr. (*izquierda*), Mark A. Powell (*derecha*)
84	Patricia J. Wynne
87-88	Johnny Johnson
92	*Alice's Adventures in Wonderland*
93-95	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

MATILDE BARON, ANA CHUECA y JULIO L. GORGE ("Inhibición de la fotosíntesis por herbicidas") llevan varios años trabajando sobre el mecanismo de acción de los herbicidas en la Unidad de Bioquímica Vegetal de la Estación Experimental del Zaidín, Granada, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Chueca y López Gorgé, profesores de investigación de dicho organismo, son doctores en farmacia por las universidades de Madrid y Granada, respectivamente. Después de varias estancias en laboratorios de Inglaterra y Francia, emprendieron una línea de investigación sobre fotosíntesis y sus inhibidores, sobre la que han desarrollado varios proyectos de trabajo. Barón se doctoró en ciencias por la Universidad de Granada con una tesis sobre el mecanismo de acción de herbicidas carbámicos, que le valió la calificación de premio extraordinario; actualmente cumple una estancia de dos años en la Universidad de Constanza, en la República Federal Alemana.

VICTOR E. VIOLA y GRANT J. MATHEWS ("Síntesis cósmica de litio, berilio y boro") colaboran desde hace más de una década en el estudio de la síntesis cósmica de los elementos. Viola enseña química en la Universidad de Indiana y dirige el ciclotrón de ese centro. Cursó estudios en la Universidad de Kansas y, en 1961, se doctoró por la de California en Berkeley. Antes de acceder a la cátedra de Indiana, Viola había enseñado en la Universidad de Maryland en College Park, donde nació su colaboración con Mathews. Dirige éste un grupo de investigación de astrofísica nuclear del Laboratorio Nacional estadounidense Lawrence Livermore. Diplomado por la Universidad estatal de Michigan, en 1977 se recibió de doctor por la de Maryland con el que constituía su primer trabajo sobre la síntesis de litio, berilio y boro.

TOMASO POGGIO y CHRISTOF KOCH ("Sinapsis que computan el movimiento") estudian los procesos de cómputo en máquinas y seres vivos, Poggio en calidad de profesor del Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y Koch como profesor asociado de computación y sistemas neuronales, del Instituto de Tecnología de California. Poggio se doctoró en física teórica, en 1970, por la Universidad de Génova y se trasladó al Instituto Max Planck de Biocibernética de Tübingen para estudiar el procesamiento de la información visual. Sigue investigando sobre la visión en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT; también es codirector del Centro de Procesamiento de la Información Biológica (CBIP), igualmente del MIT, donde analiza el proceso de cómputo por parte del cerebro. Koch, que estudió física y filosofía en la Universidad de Tübingen, se recibió de doctor por el Instituto Max Planck de Biocibernética en 1982, tras colaborar con Poggio.

STEPHEN H. SCHNEIDER ("Modelos climáticos") es vicedirector del programa de estudios superiores del Centro Nacional estadounidense de Investigación Atmosférica (CNIA) en Boulder, Colorado. Se diplomó por la Universidad de Columbia, que le concedió el doctorado en ingeniería mecánica en 1971. Su interés por los cambios climáticos, sus causas naturales y humanas y su impacto en la gestión de los asuntos públicos le ha llevado a colaborar con diversas instituciones: la Comisión de Recursos Naturales de la Academia Nacional estadounidense de Ciencias, el Instituto Goddard de Estudios Espaciales, de la NASA, y, desde 1972, el CNIA. Asesor científico años atrás de Nixon y Carter, dirige hoy la revista *Climate Change* y es autor de varios libros de divulgación.

ANTHONY CERAMI, HELEN VLASSARA y MICHAEL BROWNLEE ("Glucosa y envejecimiento") colaboran en el departamento de bioquímica médica de la Universidad de Rockefeller y muestran un interés común por la diabetes y los procesos de envejecimiento. Cerami es titular de la cátedra R. Gwin Follis-Chevron, coordinador de estudios licenciatura y postgrado y jefe del laboratorio de bioquímica médica. Formado en las universidades Rutgers y Rockefeller, se doctoró por este último centro en 1967. Vlassara enseña bioquímica médica. Licenciada en medicina por la facultad correspondiente de la Universidad de Atenas, se trasladó a Estados Unidos para realizar el período de residencia en la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia. Brownlee, profesor adjunto de bioquímica médica, se licenció en medicina por la Universidad de Duke. Se trasladó a Rockefeller tras un período de docencia en la Universidad de Harvard.

JAMES S. WALKER y CHESTER A. VAUSE ("La reaparición de fases") se conocieron e iniciaron su colaboración en la Universidad de Pennsylvania, siendo ambos investigadores de postdoctorado. En la actualidad Walker es profesor adjunto de física de la Universidad estatal de Washington; en 1978 se recibió de doctor en física por la Universidad de Washington. Realizó trabajos de postdoctorado en Pennsylvania, el Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Universidad de California en San Diego. En 1983 accedió a la plaza que ocupa hoy. Vause es profesor ayudante de física y astronomía de la Universidad de Hawai en Manoa. Doctor por la Universidad Rutgers desde 1979, se trasladó a la de Pennsylvania, donde, desde 1981 hasta 1983, fue miembro del Consejo Nacional estadounidense de Investigación. En 1983 regresó a Hawai.

WILLIAM C. DAVIS ("Detonación de los explosivos") trabaja en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Se diplomó en ingeniería por la Universidad de Tufts y es doctor en física por la Johns Hopkins desde 1954. Desde entonces está en Los Alamos, donde ha centrado su interés en la física de las detonaciones. En sus investigaciones se ha servido de un enfoque a la vez teórico y experimental, utilizando fotografía de gran velocidad y sistemas de rayos X.

JAMES CHILDRESS, HORST FELBECK y GEORGE N. SOMERO ("Simbiosis en las profundidades marinas") han trabajado juntos varios años, explorando las adapataciones mediante las cuales los animales medran en el ambiente único de los humeros del océano abisal. Childress es profesor de biología de la Universidad de California en Santa Bárbara. Se doctoró en biología por la Universidad de Stanford y se incorporó al claustro docente de Santa Bárbara en 1969. Felbeck es profesor ayudante de biología de la Institución Oceanográfica Scripps. Se doctoró por el Instituto de Zoología de la Universidad de Münster, en 1979, e investigó en Scripps. Somero, profesor de biología y director de la división de investigación de biología marina de Scripps, se recibió de doctor por Stanford en 1967 y realizó estudios de postdoctorado en la Universidad de Columbia Británica. Se trasladó a Scripps en 1970.

Hace

José M.ª López Piñero

...doscientos años

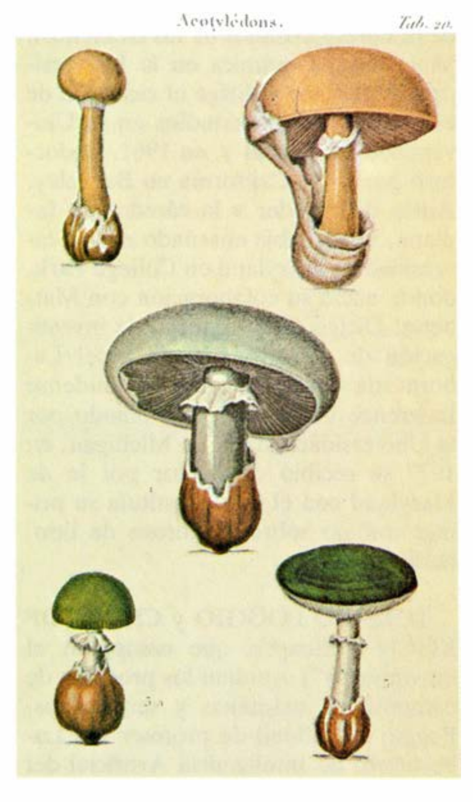
Nació, en Maó, Mateu Josep Bonaventura Orfila i Rotger, generalmente considerado como fundador de la toxicología moderna. Era hijo de un armador, quien se preocupó de que tuviera desde niño una cuidada formación. Antes de abandonar Menorca, Orfila aprendió latín, francés, inglés y alemán, aparte de iniciar su preparación científica, principalmente en matemáticas, física e historia natural. A través de las obras de Lavoisier y Fourcroy empezó también a interesarse por la química. Ello contribuyó a que abandonara el primitivo proyecto de su padre de que se dedicara a la carrera náutica, sobre todo después de un viaje a Egipto en uno de los barcos propiedad de la familia, en el que pudo comprobar su escasa inclinación hacia la vida de marino.

En 1804, cuando tenía 17 años, marchó a Valencia para estudiar allí medicina. Sin embargo, le defraudó totalmente la enseñanza que entonces ofrecía su Universidad, en la que se había frustrado buena parte de las posibilidades abiertas dos décadas antes por el plan renovador del rector Vicente Blasco. En consecuencia, se trasladó a Barcelona, donde entró en relación con el farmacéutico Francisco Carbonell y Bravo, que enseñaba con gran prestigio química aplicada en la Real Junta de Comercio. Esta institución pensionó a Orfila para que ampliara sus estudios sobre la materia, primero en Madrid, bajo la dirección de Luis José Proust, y a continuación en París. El regreso de Proust a Francia hizo, no obstante, que se dirigiera a París, ciudad a la que llegó a mediados del año 1806 y en la que residió hasta su muerte.

La guerra de la Independencia interrumpió el pago de la pensión de la Junta de Comercio, por lo que Orfila tuvo que mantenerse dando clases particulares, que compaginó con su trabajo en los laboratorios de Vauquelin y de Fourcroy y con los estudios de medicina. En 1811 se graduó de doctor con la tesis titulada *Nouvelles recherches sur les urines des ictériques* y ese mismo año se nacionalizó francés. A partir de entonces inició sus investigaciones toxicológicas sobre la morfina, el ácido arsenioso, las preparaciones mercuriales y otras sustancias. Aparte de dar a conocer los resultados en diversos artículos y memorias, ofreció una exposición sistemática de la disciplina en su célebre *Traité des poisons ou toxicologie générale*, cuya primera edición, aparecida entre 1814 y 1815, fue pronto seguida por otras y por traducciones a diversos idiomas. Afincado definitivamente en París, en 1815 contrajo matrimonio con una joven francesa, por las mismas fechas en las que renunció a una oferta para enseñar química en Madrid.

En 1817, Orfila i Rotger publicó unos *Eléments de chimie médicale* y, al año siguiente, una obra de toxicología dirigida al gran público que le dio gran notoriedad: *Secours à donner aux personnes empoisonnés ou asphysiées, suivis des moyens propres à reconnaître les poisons, et à distinguer la mort réelle de la mort apparente*. Accedió al profesorado oficial en 1819 como titular de la cátedra de medicina legal en la Facultad de Medicina, de París. Escribió asimismo un tratado sobre esta materia, que apareció originalmente con el título de *Leçons faisant partie du cours de médecine légale* (1821), así como numerosos trabajos y algunas monografías, entre las que destacan un *Traité des exhumations juridiques* (1831), redactado en colaboración con Octave Lesueur, y una *Mémoire sur la suspension* (1840). No obstante, su interés continuaba centrado en la toxicología, por lo que en 1823 pasó a ocupar la cátedra de química médica, de la que fue titular hasta su muerte, con el único paréntesis del período que desempeñó el cargo de decano de la Facultad (1831-1848).

Orfila era de ideología política conservadora y llegó a recibir el nombramiento de médico de Luis XVIII. Su gestión como decano coincidió, sin embargo, con el reinado de Luis Felipe, de cuyo régimen llegó a ser una de las personalidades científicas oficiales más influyentes. Bajo su dirección, no solamente se reorganizaron los servicios clínicos y algunos de disciplinas básicas, entre ellos, los de disección, materia médica, física y química, sino que se hicieron fundaciones tan importantes como el museo de anatomía patológica (Museo Dupuytren) y el de anatomía comparada (que acabaría llamándose Museo Orfila). Por otra parte, se integró en los ambientes de la aristocracia y de la alta burguesía, al mismo tiempo que conseguía gran fama por sus dictámenes periciales en sonados procesos criminales. El más famoso de estos últimos fue el de Marie Cappelle, Madame Laffarge, acusada de haber envenenado a su marido con arsénico en el castillo de Glaudier (Tulle); el interés del caso residía en los informes de los peritos químicos, por lo que emitieron dictámenes personalidades tan importantes como Raspail, Dumas, Lelong y Dupuytren, todos los cuales se mostraron disconformes con Orfila, quien frente a ellos pudo de-



1. Tres láminas del atlas del

mostrar la presencia de arsénico en las vísceras del fallecido, siendo su esposa condenada a trabajos forzados en el año 1840.

Resulta lógico que la revolución democrática de 1848 significara un duro golpe para la posición social y académica de Orfila. Fue destituido de su cargo de decano, se nombró una comisión para investigar su gestión e incluso se pidió desde el gobierno su separación de la cátedra de química médica, que no llegó a producirse. Con la natural amargura discurrió el último lustro de su vida. Murió en el mismo París en 1853 y legó a la Académie de Médecine y a otras instituciones científicas la considerable suma de ciento veinte mil francos, destinada a premios y fundaciones.

Aunque Orfila realizó una notable labor en medicina legal y química médica, su condición de figura científica de primer rango se debe a su obra toxicológica. Integrando los planteamientos propios de la mentalidad anatomoclínica y los recursos de la nueva química y de la investigación experimental en animales, sentó las bases teóricas de la toxicología moderna e ideó técnicas que permitieron el reconocimiento de los venenos con un método científico riguroso e iniciaron la terapéutica racional de los envenenados. Entre sus aportaciones doctrinales destaca la demostración experimental de la importancia de la vía hemática en la difusión de los venenos en el organismo, así como la formulación del

VÉGÉTAUX.
Dicotylédons.
Tab. 8.

Turpin pinx.t
Plée père sculp.t

Solanée.

BELLADONE commune.

ATROPA belladona. (Lin.)

(1/2 Grand. nat.)

1. Corolle et étamines. 2. Pistil. 3. Coupe horizontale d'un fruit accompagné du calice persistant. 4. Graine grossie. 5. Id. Coupée verticalement. a. Tégument. b. Endosperme. c. Embryon.

VERTÉBRÉS. Erpétologie. Tab. 25.

Meunier pinx.t
Plée père sculp.t

Ophidiens.

VIPÈRE commune.

COLUBER berus. (Lin.)

(1/3 Grand. nat.)

1. Tête vue de profil, de grandeur naturelle. a. Glande qui sécrète le fluide venimeux. b. Canal excréteur de la glande. c. Poche de la gencive contenant les dents maxillaires. d. Dent maxillaire en action.

Traité de médecine légale *(1848), de Orfila. Representan tres setas del género* Amanita: A. bulbosa alba *(1),* A. citrina *(1 y 2a) y* A. viridis *(3 y 3a); la belladona y la víbora común*

concepto de antitóxico y de sus dos mecanismos principales de acción: la evacuación y la neutralización. En el problema de la detección de los venenos, sus planteamientos partieron de considerar insuficientes el reconocimiento en los excreta y el estudio de los síntomas. Desde una perspectiva típicamente anatomoclínica situó en un primer plano la necropsia, creando un método en el que las piezas anatómicas eran sometidas a un doble examen anatomopatológico y químico.

La influencia de la obra toxicológica de Orfila desbordó ampliamente los límites de esta disciplina y los de la medicina legal. Sus investigaciones de laboratorio pesaron de modo directo en el desarrollo inicial de la farmacología experimental y también en la orientación de las ciencias fisiológicas. Por otra parte, su explicación científica del mecanismo de acción de los venenos inició una nueva etapa de la etiología, al superar definitivamente el carácter "misterioso" y "oculto" que hasta entonces habían tenido como causas de enfermedad. En consecuencia, se convirtió en un auténtico modelo de la mentalidad etiológica, cuyo influjo llegó a ser tan considerable que obstaculizó durante algunos años otros acercamientos causales, entre ellos, la aplicación de la microbiología al estudio de las enfermedades infecciosas.

Como muestra de la obra de Orfila ofreceremos unos fragmentos de la introducción de la cuarta edición de su tratado de toxicología, cuya versión castellana fue publicada en Madrid el año 1845:

"Imposible es estudiar de una manera completa una sustancia venenosa, sin considerar sus relaciones con la química, historia natural, fisiología, patología y anatomía patológica. En efecto ¿cómo podría uno lisonjearse de distinguir los diversos venenos sacados del reino mineral, sin conocer las propiedades químicas que les caracterizan cuando se hallan en su estado natural, o disfrazados, combinados o descompuestos por su incorporación con los alimentos vegetales o animales? ¿La historia natural no nos suministra los medios de caracterizar los venenos del reino orgánico cuya mayor parte se resisten desgraciadamente a las investigaciones analíticas más rigurosas? La acción irritante, narcótica, etc. de algunas sustancias venenosas, desordenando las diversas funciones de la economía animal ¿se puede acaso explicar sin las luces de la fisiología? ¿No es uno de los resortes de la patología ocuparse cuidadosamente del tratamiento de las enfermedades a que dan lugar los venenos, ya haciendo uso de los medios conocidos, ya buscando nuevas sustancias capaces de destruir y desvanecer sus efectos deletéreos? Por último, ¿la anatomía patológica no perfecciona el estudio de estas sustancias, esclareciéndonos, por el examen de diversos órganos, con las lesiones multiplicadas que pueden ser el resultado de su acción? No hay duda: es menester recurrir a cada una de estas ciencias, consultarlas al principio separadamente para poder conocer después sus dependencias mutuas y los auxilios que pueden prestar. Las investigaciones químicas ejecutadas con cuidado sobre los venenos minerales y vegetales; la observación atenta de los caracteres suministrados por las diferentes sustancias venenosas del reino orgánico: los experimentos sobre los animales vivos, con el objeto de patentizar la turbación de las funciones, y las varias causas de un género de muerte tan acelerada; los datos clínicos recogidos con exactitud y enriquecidos con los resultados de las autopsias de los cadáveres; finalmente, los ensayos sobre los animales vivos para fijar nuestras ideas acerca de los contravenenos; tales son los medios capaces de enriquecer la toxicología. La utilidad en seguir esta marcha la conocieron los hombres de talento: así se vieron aparecer sucesivamente excelentes monografías sobre el arsénico, sublimado corrosivo, cobre, ácidos azoético, cianhídrico, etc. Estos tratados particulares se encuentran por desgracia en muy pequeño número y los objetos no se hallan allí considerados bajo todos los aspectos; se descuida especialmente la parte química, o médico-legal del envenenamiento; se ve casi siempre a sus autores elegir las propiedades menos sobresalientes de las sustancias venenosas, exponerlas muchas veces de una manera errónea y hacer por consecuencia imposible la solución de un problema muy difícil por sí mismo. En vano el médico o el farmacéutico requeridos por el magistrado recurrirían a sus escritos; todo lo que de allí pudiesen sacar sería vago e insuficiente...

"Por numerosos que sean los experimentos y las observaciones sobre el envenenamiento, no los creo aún suficientes para establecer una clasificación al abrigo de toda reconvención; tarea semejante me parece de tal modo superior a mis fuerzas, que renuncio a ejecutarla al presente. Haré conocer en pocas palabras las dificultades de este trabajo. No pueden clasificarse de un modo conveniente los venenos sino conociendo justamente el órgano a que se dirigen y el género de alteración que en él determinan. Este conocimiento no puede adquirirse a menos que no se estudien profundamente los síntomas que desarrollan y lesiones que causan; además, estos síntomas y estas lesiones varían en un gran número de casos, según la dosis; así, cuando se introduce en el estómago una gran dosis de un veneno irritante muy enérgico, se ve al animal agitado de movimientos convulsivos espantosos; expira algunos minutos después, no descubriéndose a su muerte sino una ligera inflamación de la víscera que recibió el veneno. Al contrario, si la sustancia irritante se ha administrado en cortas dosis muchas veces reiteradas, el animal cae en un gran estado de insensibilidad, el estómago y los intestinos se inflaman, se ulceran, etc.; la muerte en este caso no acaece regularmente sino después de muchos días: es con evidencia el resultado de la alteración orgánica del canal digestivo. ¿Se objetará tal vez que en estos dos casos que acabo de referir, el veneno obra de la misma manera, pero que determina afecciones cuya intensidad varía? Si esto fuese así, sería preciso admitir que una ligera inflamación del estómago, producida por una gran dosis de veneno, es capaz de ocasionar la muerte en el espacio de algunos minutos, hecho que es inadmisible.

"¿Cómo se puede clasificar metódicamente esa serie innumerable de venenos que parecen obrar sobre el sistema nervioso de una manera tan varia y que no dejan después de la muerte señal alguna de su acción? Podemos a la verdad formar dos grupos naturales: 1.º los que determinan la excitación de la médula espinal, los cuales se encuentran en corto número: 2.º los que obran sobre el cerebro o las otras partes del sistema nervioso. Mas, admitiendo esta división, ¡cuántas sustancias desiguales comprendería el último grupo! La idea de dividir estos grupos en dos clases, la una que contuviese los venenos irritantes, y la otra los debilitantes del sistema nervioso, no me parece mejor. Por otra parte, ¿qué vendrían a ser entonces las sustancias venenosas cuya acción sobre este sistema no pudiese comprenderse en algunas de estas secciones? Las alteraciones de que es susceptible el sistema nervioso, en sus diversas partes, no están suficientemente conocidas para que sea permitido fundar sobre ellas una clasificación razonada."

Inhibición de la fotosíntesis por herbicidas

El conocimiento de la estructura y función de la proteína Q_B del cloroplasto permite diseñar una nueva arma genética en la lucha contra las malas hierbas

Matilde Barón, Ana Chueca y Julio López Gorgé

La sal común se aplicó desde la antigüedad a los lindes de los caminos para evitar el crecimiento de la vegetación. Con el desarrollo de la industria se comenzó a aprovechar ciertos residuos para idéntica finalidad herbicida. Pero hubo que esperar hasta 1932 para ensayar la eficacia controladora de malas hierbas de la primera sustancia química creada con ese propósito: el DNOC (siglas del 2-metil 4, 6-dinitrofenol). Años más tarde se descubrieron análogos químicos de las hormonas vegetales, lo que contribuyó decisivamente a la generalización del uso de tales agentes. Hoy superan la cifra de 300 los compuestos herbicidas, de características físicas y químicas muy diversas.

Pero desde el primer momento alcanzaron un papel relevante los herbicidas que ejercen su acción fitotóxica inhibiendo la actividad fotosintetizadora de la planta. Ello se justifica, en parte, por la extraordinaria sutileza de la maquinaria fotosintetizadora, que la convierte en muy sensible a la acción selectiva de agentes extraños, y, en parte, por la íntima relación entre fotosíntesis y vida vegetal. En este terreno merecen citarse los trabajos pioneros de W. G. Templeman y W. A. Sexton, de la Imperial Chemical Industries (Gran Bretaña), con los N-fenilcarbamatos, herbicidas estos que entraron en seguida en la práctica agronómica. La década de los sesenta fue decisiva para su desarrollo, y hoy puede decirse que más de la mitad de los herbicidas en uso agronómico inciden, de una u otra forma, en el proceso de fotosíntesis.

En un sentido amplio, se entiende por fotosíntesis el proceso a través del cual algunos organismos —cierto tipo de bacterias, algas y plantas superiores— captan y transforman la radiación luminosa en compuestos de alto poder reductor o de una elevada energía química de enlace; esos productos se utilizan luego en la reducción y asimilación de elementos constituyentes de la materia viva (carbono, nitrógeno y azufre) que suelen darse, en la naturaleza, en un estado altamente oxidado. En la fotosíntesis intervienen, de una manera destacada, los pigmentos, que son los componentes coloreados del vegetal, clorofilas y carotenoides entre ellos; en virtud de su especial estructura química se hallan capacitados para captar energía lumínica, pasando a formas excitadas de alto poder reductor. Durante el proceso de fotosíntesis se producen también intercambios gaseosos con el exterior del organismo, verbigracia, toma de anhídrido carbónico y desprendimiento de oxígeno en los vegetales superiores. Esos intercambios tienen lugar a través de los poros o estomas de la superficie foliar de la planta.

Los cloroplastos son estructuras subcelulares de las algas eucariotas y del tejido fotosintetizador de las plantas superiores, donde se hallan alojados los pigmentos captadores de luz y demás constituyentes esenciales del proceso de fotosíntesis. Hay entre los últimos una serie de compuestos que pueden existir en forma reducida y oxidada; merced a su ordenación espacial en el interior del cloroplasto, actúan transfiriéndose ordenadamente electrones en una auténtica cadena de transporte que, finalmente, llegarán a un aceptor último: el fosfato de dinucleótido adenín nicotínamida ($NADP^+$). Esos electrones proceden de una molécula más o menos oxidada -agua para las algas y plantas- que, por un complejo mecanismo de fotoactivación, cede equivalentes de reducción. (Así se llama las unidades básicas de transferencia de potencial óxido-reductor; se corresponden con la cesión de un electrón, aunque en algunos procesos de reducción la donación de electrones vaya acompañada de una captación paralela de protones.) En esos procesos sucesivos de donación y recepción de electrones, o de oxidación-reducción, que ocurren entre eslabones vecinos de la cadena, se libera energía. Esta, al menos en parte, se acopla durante el proceso de fosforilación a la síntesis de enlaces energéticos en forma de trifosfato de adenosina (ATP).

En el cloroplasto se distinguen unas envolturas que lo limitan, una solución estromática y una estructura lamelar inmersa en dicha solución [véase "Asimilación del carbónico por la planta", por Antonio Plá, Ana Chueca, Juan J. Lázaro y Julio López Gorgé; Investigación y Ciencia, marzo de 1985]. La estructura lamelar está constituida por sacos membranales donde se alojan los pigmentos fotoactivos y los restantes componentes de la cadena de transporte electrónico, así como el sistema subsidiario de síntesis de compuestos energéticos. En la composición de las lamelas entra, en números redondos, un 50 por ciento de lípidos y otro 50 por ciento de proteínas. Del valor citado de los lípidos, un 20 por ciento son pigmentos, y de éstos un 80 por ciento corresponden a las clorofilas. Las proteínas de las lamelas pueden ser estructurales, es decir, incrustadas en el espesor de las membranas como elementos básicos de su armazón, o bien débilmente ligadas a la

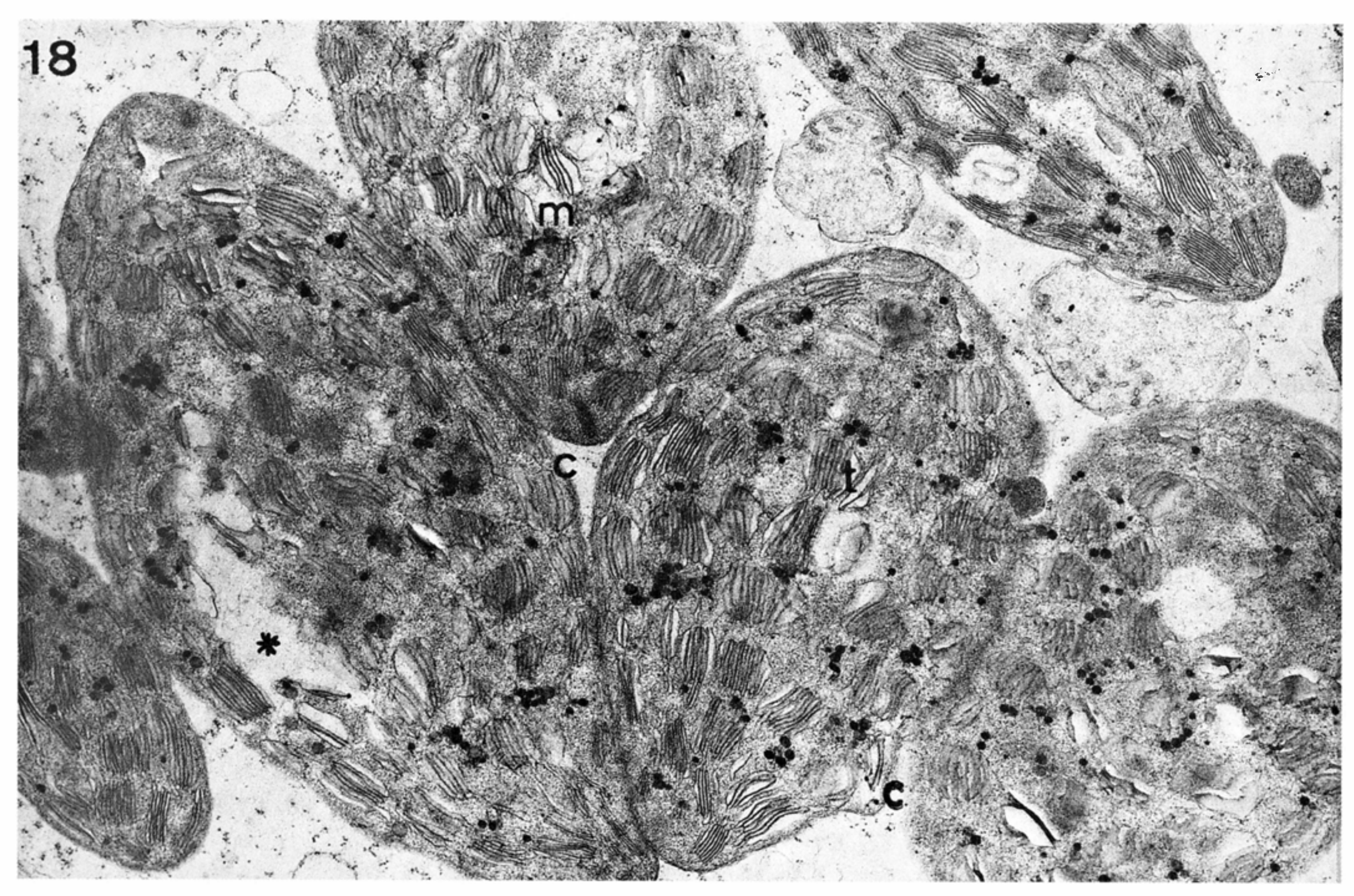
periferia de las mismas. La heterogeneidad de estas proteínas se pone de manifiesto con la cuarentena de fracciones polipeptídicas que se detectan por electroforesis en gel de acrilamida después de su solubilización con detergentes. Once de ellas se encuentran asociadas al fotosistema II. (Distínguese éste del fotosistema I, entre otras características, por una mayor efectividad en la captación de luz en la zona de 680 nanómetros y en que en él se encuentran localizados los componentes que forman parte del sistema de lisis del agua.) La técnica de electroforesis permite separar compuestos que sustentan una carga eléctrica cuando, en un medio que actúa como tamiz molecular, se someten a la acción de un campo eléctrico.

De los 11 polipéptidos detectados en el fotosistema II, tres de ellos, de pesos moleculares 28, 26 y 24 kilodalton, están asociados a los complejos pigmentarios de captación de luz. Otros tres, de 33, 23 y 17 kilodalton, respectivamente, desempeñan cierto papel, aún desconocido, en el proceso de rotura de la molécula de agua. Los cinco últimos restantes son proteínas intrínsecas de membrana: de ellos, dos, los denominados CP-47 y CP-43, con pesos moleculares de 47 y 43 kilodalton, respectivamente, parecen estar asociados al centro de reacción P-680; otros dos, D1 y D2, son polipéptidos relacionados con una entidad superior, la proteína Q_B, de la que nos ocuparemos en seguida; el quinto, y menor, posee una dimensión molecular de 10 kilodalton y es la apoproteína unida al citocromo *b*559. Ambos tipos de componentes, lípidos y proteínas, guardan una íntima relación y constituyen un entramado tridimensional donde aparecen localizados los restantes elementos de la cadena de transporte.

Ante semejante complejidad del proceso fotosintetizador no debiera resultarnos extraño que las posibilidades de actuación de los herbicidas sobre el mismo sean muy varias. En este sentido cabe distinguir entre inhibidores de la síntesis de pigmentos fotosintetizadores (amitrol, piriclor, SAN 6706, etcétera), obstructores de los cambios gaseosos del cloroplasto a través de los movimientos de apertura y cierre de los estomas (ácidos fenoxialquil carboxílicos y otros), secuestradores de electrones en el flujo electrónico de la fotosíntesis (paraquat, diquat, etcétera), desacoplantes e inhibidores de la transferencia energética en el proceso de fosforilación (DNOC, dinoseb, etcétera). De todos ellos, los inhibidores del transporte electrónico de la fotosíntesis son los herbicidas que han adquirido mayor relevancia, tanto por la diversidad de estructuras químicas cuanto por su eficacia fitotóxica, sin dejar en segundo plano su interés agronómico y su importancia en investigación fundamental en este área. Seikichi Izawa, del departamento de botánica y patología vegetal de la Universidad de Michigan, ha descrito hasta seis posibles lugares de actuación, dentro de la cadena de transporte electrónico de la fotosíntesis, para este grupo de compuestos. De ellos, los que intervienen en el punto segundo son, con mucho, los más importantes.



1. PLANTAS DE GUISANTE tratadas con fenmedifam. A los 20 días después de germinadas las semillas, plántulas de guisante (*Pisum sativum* L.), mantenidas en un medio nutritivo líquido, se sometieron a pulverización foliar con soluciones de concentración creciente de fenmedifam. El fenmedifam es un herbicida carbámico que tiene un mecanismo de acción paralelo al del diurón, anclándose como él en las membranas del cloroplasto a través de la proteína Q_B. La imagen corresponde a 20 días después de tratar con fenmedifam al 0,015 por ciento (*A*), 0,003 por ciento (*B*) y 0,0015 por ciento (*C*). (*T*) es un testigo.



2. CLOROPLASTOS de hojas de espinaca tratadas con fenmedifam. En la microfotografía electrónica, efectuada con 15.000 aumentos, aparecen varios cloroplastos de una célula fotosintética de hojas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) tratadas con fenmedifam al 0,003 por ciento. Puede observarse una falta de concreción de las envolturas interna y externa (*c*), distorsión del sistema de membranas (*m*), tilacoides dilatados (*t*) y áreas de estroma degradadas (*).

La captación de energía radiante la realiza el cloroplasto a través de las antenas, que son bloques de sistemas pigmentarios de clorofilas, carotenos y xantofilas; estos sistemas, asociados a las correspondientes proteínas, configuran los complejos cosechadores de luz (CCL). En el proceso, dos fotoreacciones operan en serie para elevar electrones desde el agua, un donador con alto potencial redox, al aceptor final $NADP^+$, de bajo potencial redox. Una y otra reacción se desarrollan en sendos centros: en los fotosistemas I y II, cuyos componentes fotoactivos son dímeros de clorofila *a*, denominados, respectivamente, P-700 y P-680.

La captación fotónica por ambos fotoistemas dímeros viene facilitada y canalizada vía los correspondientes CCL, e induce un estado excitado en los centros P-700 y P-680, que ceden inmediatamente un electrón a los aceptores primarios respectivos: el componente X, de naturaleza aún incierta, para el fotosistema I, y una feofitina para el fotosistema II. A consecuencia de ello aparecen los radicales catiónicos $P\text{-}700^+$ y $P\text{-}680^+$, que, por su elevado potencial redox, son inmediatamente reducidos por los donadores primarios de ambos fotosistemas, plastocianina y el llamado componente Z. A su vez, la plastocianina se verá reducida por el flujo electrónico procedente del fotosistema II, en tanto que el componente Z, tras acumular cuatro cargas positivas a consecuencia de cuatro fotoactos sucesivos en P-700, recupera su situación basal mediante los cuatro electrones que proceden de la escisión o ruptura de dos moléculas de agua, con desprendimiento simultáneo de oxígeno.

Finalmente, el flujo de electrones procedente del fotosistema I suministra los equivalentes de reducción necesarios para la síntesis del potencial reductor generado en la fotosíntesis; esto es, $NADP^+$ deviene, por asunción de dos electrones y un ion de hidrógeno, NADPH. Por potencial redox de un compuesto se entiende la facilidad que tiene de ganar electrones (alto potencial) o de perderlos (bajo potencial); viene dado por un valor que expresa dicha capacidad en comparación con un sistema que se toma por modelo: $H_2 \rightleftarrows 2H^+ + 2e^-$.

Además del centro de reacción P-680 y de los componentes antes mencionados, el fotosistema emplea otros transportadores adicionales. Así, Q_A, aceptor secundario de dicho fotosistema, es de naturaleza quinónica, reduciéndose a forma semiquinona al recibir un solo electrón. Por su parte, el componente Q_B, quinónico también, acepta un par de electrones de sendas moléculas de Q_A, que se ceden ya por pares a la plastoquinona (PQ), una tercera quinona en la secuencia de transportadores. Todos los elementos de la cadena de transporte se hallan embebidos en la intimidad de la membrana lamelar, con una orientación más o menos superficial según su afinidad con el agua o con los lípidos. De lo expuesto se deduce que se impone una ordenación espacial de la CCL, los fotocentros y los elementos de la cadena de transporte para la adecuada función de la misma, ordenación que determinará una secuencia topográfica de los eslabones transportadores según sus potenciales redox y una seriación de los elementos fotoquímicos en favor de una óptima captación de la luz, entre otros efectos.

En el punto II, correspondiente a la

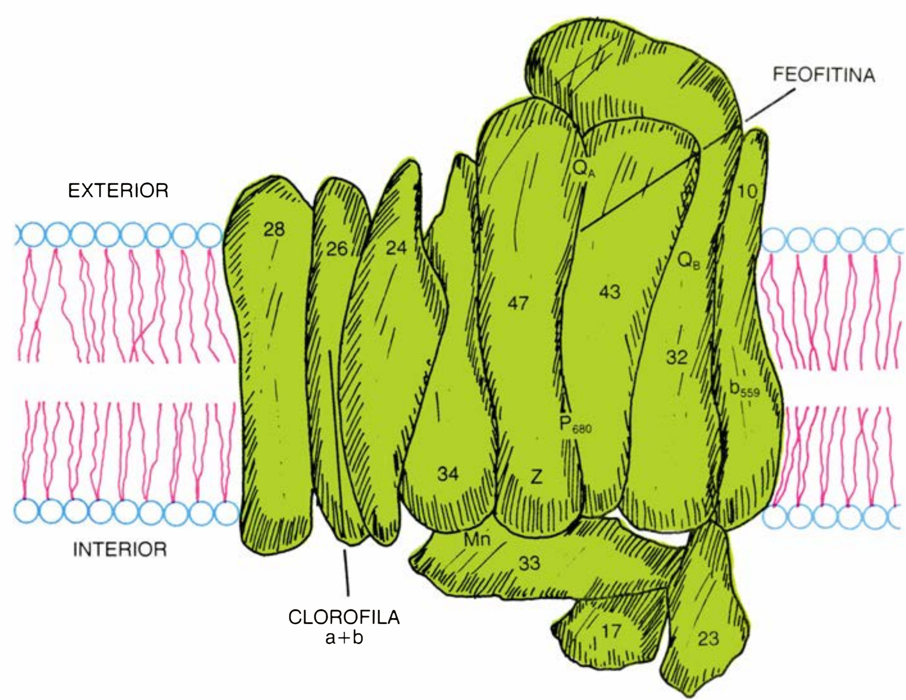
zona de transporte de las tres quinonas indicadas, Q_A-Q_B-PQ, actúan la mayoría de los herbicidas que inhiben la cadena de transporte electrónico de la fotosíntesis. El ejemplo más característico nos lo ofrece el diurón, o DCMU, un derivado clorado de la fenil-urea introducido en 1956 por J. S. C. Wessels y R. Van der Veen, de la N.V. Philips de Holanda, como herbicida. En presencia del mismo queda inhibida la reducción de la plastoquinona, al propio tiempo que se incrementa la emisión de fluorescencia a consecuencia de un estado sobreexcitado del centro P-680 y de la reducción completa del componente Q_A, por no poder drenarse hacia la plastoquinona los electrones excitados por la luz; hechos todos que llevaron a Louis Duysens y Jan Amesz, del departamento de biofísica de la Universidad neerlandesa de Leiden, a propugnar que el derivado DCMU bloqueaba la transferencia electrónica entre los aceptores Q y el acervo de plastoquinona.

Otros compuestos químicos que intervienen en lugares análogos son otras fenil-ureas (metoxurón, cloroxurón, etcétera), las triazinas (de las que citaremos la simazina y la atrazina), los uracilos (bromacil, terbacil y otros de la misma familia), las amidas (propanil, cipromid, etcétera) y las piridazinonas (el pirazón, por ejemplo). Recientemente, los autores de este artículo han descubierto una acción similar en los aril-carbamatos fenmedifam y SWEP. Tamaña diversidad estructural ha instado la búsqueda de relaciones estructurales entre esos inhibidores. Todos ellos se caracterizan por presentar una amplia zona molecular de naturaleza lipófila, responsable de su accesibilidad a la membranas, junto con una función polar de anclaje a la misma, constituida por un átomo de nitrógeno unido a otro de carbono que es deficiente en electrones. En virtud de la reversibilidad del anclaje, la unión tiene que ser forzosamente débil, por fuerzas no covalentes, sino de puentes de hidrógeno probablemente.

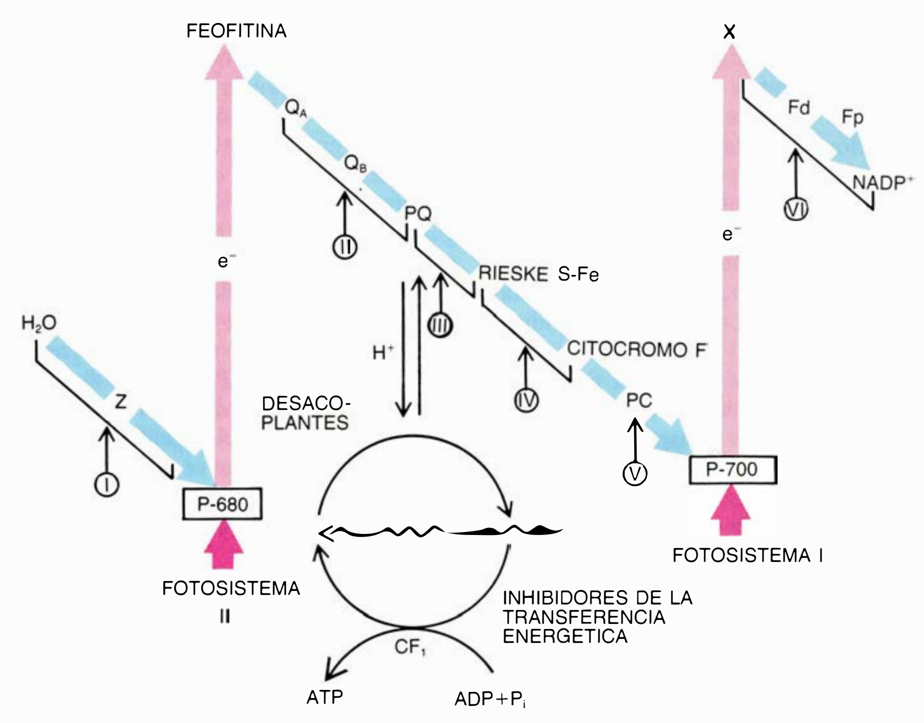
La interpretación del mecanismo de actuación de este grupo de herbicidas ha experimentado en los últimos años un giro espectacular promovido por los nuevos hallazgos. En 1976, Gernot Renger, de la Universidad Técnica de Berlín, propuso que los componentes Q_A y Q_B estaban rodeados por una estructura proteica de naturaleza lipofílica, que en este sentido servía de aislante de los mismos ante la fase acuosa estromática, asignándole un papel de regulador alostérico del flujo electrónico entre ambas quinonas y la plastoquinona. Ocurría, en efecto, que una digestión controlada de las membranas con tripsina degradaba dicha proteína y quedaba progresivamente afectado el flujo de electrones. La pérdida de la capacidad de inhibición por DCMU del flujo electrónico, después del tratamiento de membranas cloroplastídicas con tripsina, hizo concebir a Renger la idea de que este herbicida actuaba a través de un anclaje sobre la proteína envolvente de los transportadores Q_A y Q_B. Los estudios posteriores con C14-azidoatrazina, un derivado de la atrazina que presenta el mismo mecanismo de acción que el DCMU, y que se distingue por ligarse covalentemente a las membranas cuando el complejo membrana-herbicida se somete a irradiación con luz ultravioleta, permitieron poner de manifiesto radioquímicamente la unión de dicho herbicida a la proteína membranal.

A la luz de estos resultados, Renger sugirió que dicha proteína intervenía mediando el transporte electrónico entre los componentes Q_A y Q_B: constituía un canal por donde fluían los electrones gracias a una especial disposición de residuos aminoacídicos funcionales. La unión del herbicida a la proteína debe causar modificaciones estructurales de la misma, que afectan a la zona en que ésta actúa como canalizadora del flujo de electrones, interrumpiendo su curso normal. Para algunos autores, el DCMU disminuiría el potencial redox de la quinona Q_B, que se vería imposibilitada entonces de ser reducida por el aceptor secundario Q_A. En el laboratorio de Charles Arntzen, de la compañía DuPont en Wilmington, se ha identificado la proteína receptora como un polipéptido de peso molecular 32.000, que se degrada a entidades de 16.000-18.000 después del tratamiento con tripsina.

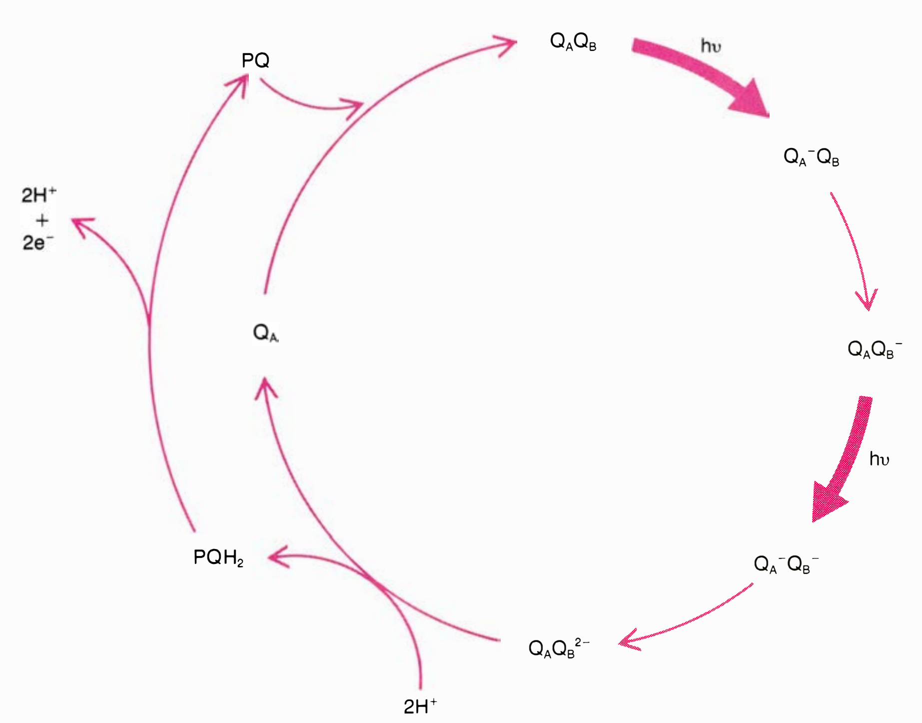
En 1983 se celebró en la localidad holandesa de Wageningen un simposio internacional dedicado a los mecanismos de actuación de los herbicidas en la fotosíntesis, entre cuyas conclusiones se reconocía la existencia de una proteína coraza ligada a la quinona Q_B, para la que se propuso el nombre de proteína Q_B, y a la que se unirían los herbicidas del tipo DCMU mediante el desplazamiento de la quinona de su lugar de enlace y la consiguiente interrupción del flujo electrónico de la fo-



3. ESTRUCTURA TOPOGRAFICA DEL FOTOSISTEMA II. El complejo Z contiene manganeso y está estructuralmente sustentado por polipéptidos de 33, 23 y 17 kilodalton. Se orienta hacia el interior de las membranas. Está implicado en la lisis del agua, una vez acumuladas cuatro cargas positivas por cesiones sucesivas de otros tantos electrones al centro P-680. El complejo de antenas (CCL) (*zona izquierda de la figura*) contiene clorofilas *a* y *b* ligadas a polipéptidos de 28, 26 y 24 kilodalton, cuya misión consiste en captar la luz. Esta se transfiere al centro de reacción P-680, dímero de clorofila *a* topográficamente sustentado por polipéptidos de 47 y 43 kilodalton, que sustentan también a una feofitina, aceptor primario de electrones de este fotosistema. Los aceptores secundarios Q_A y Q_B son quinonas ancladas en estructuras polipeptídicas de 32 y 34 kilodalton. Un polipéptido de 10 kilodalton aparece asociado al citocromo *b*559, de papel incierto.



4. CADENA FOTOSINTETICA del transporte de electrones. Implica, en las plantas superiores, la existencia de dos fotoactos desarrollados en los fotosistemas I y II, exactamente en los respectivos fotocentros P-700 y P-680, así llamados en función de la longitud de onda de máxima absorción de luz. Son dímeros de clorofila *a*, que experimentan el salto de un electrón cortical hacia un nivel energético superior, suficiente para reducir a sus correspondientes aceptores primarios: una feofitina y el componente X, este último de naturaleza desconocida. Los fotocentros P-680 y P-700, que han perdido sendos electrones, los recuperan; el primero lo consigue induciendo la rotura del agua, en virtud de la cual dos moléculas de agua se convierten en cuatro protones H^+, una de oxígeno y cuatro electrones libres; el segundo, a través del flujo electrónico procedente del fotosistema II. Finalmente, los electrones captados por el componente X terminan reduciendo el piridín nucleótido terminal, es decir, el $NADP^+$ se transforma en NADPH. Estos procesos se desarrollan con el concurso de intermediarios quinonas (Q_A, Q_B y plastoquinona PQ), citocromo *f*, centros sulfoférricos (ferredoxina, o Fd, y centro Rieske), flavoproteínas y complejos con manganeso (centro Z) o cobre (plastocianina), ordenados según sus potenciales redox. Hay varios compuestos capaces de bloquear ese flujo de electrones del agua a NADPH, que intervienen en distintos eslabones de la cadena de transporte (I al VI).



5. ACEPTORES SECUNDARIOS del fotosistema II: las quinonas Q_A y Q_B. Después de cada fotoacto del centro P-680, la quinona Q_A acepta un solo electrón del aceptor primario feofitina, que lo cede posteriormente a la quinona Q_B. Esta acepta un segundo electrón de una nueva molécula Q_A^-, dando lugar a una forma hidroquinona Q_B^{2-}, de mucha menor afinidad por las membranas y susceptible de recibir iones de hidrógeno. Hay que destacar la identidad entre la quinona Q_B y la plastoquinona del acervo, lo que permite un intercambio continuo entre la quinona Q_B, reducida en la membrana, y la quinona PQ, libre en estado oxidado.

tosíntesis. Pero se ha corregido la interpretación del mecanismo de transporte de electrones en esta zona, en el sentido de que la quinona Q_B acepta una pareja de electrones y rinde una forma hidroquinona dotada de mucha mayor afinidad por la proteína Q_B, intercambiándose entonces con una molécula de plastoquinona (PQ) del acervo. Ello implica la identidad de la quinona Q_B y de la plastoquinona. Con el empleo de C14-azidoplastoquinona, susceptible de dar origen a enlaces estables fotoinducidos de naturaleza covalente, se ha puesto de manifiesto la capacidad de unión entre la plastoquinona y la proteína Q_B.

Queda por dilucidar si la quinona Q_B y el herbicida comparten un mismo lugar de enlace, por el que compiten, o si tienen distintos lugares de unión, aunque próximos, de suerte que la incorporación del herbicida altere negativamente, de forma alostérica, la capacidad de enlace de la quinona. Se conoce con el nombre de alosterismo el efecto modulador ejercido sobre una proteína reguladora mediante la intervención en un lugar de la misma distinto del punto donde radica el efecto regulador propiamente dicho. Quizá coexistan aquí los dos mecanismos indicados y predominará uno u otro de acuerdo con la naturaleza química del herbicida, muy variada según hemos visto.

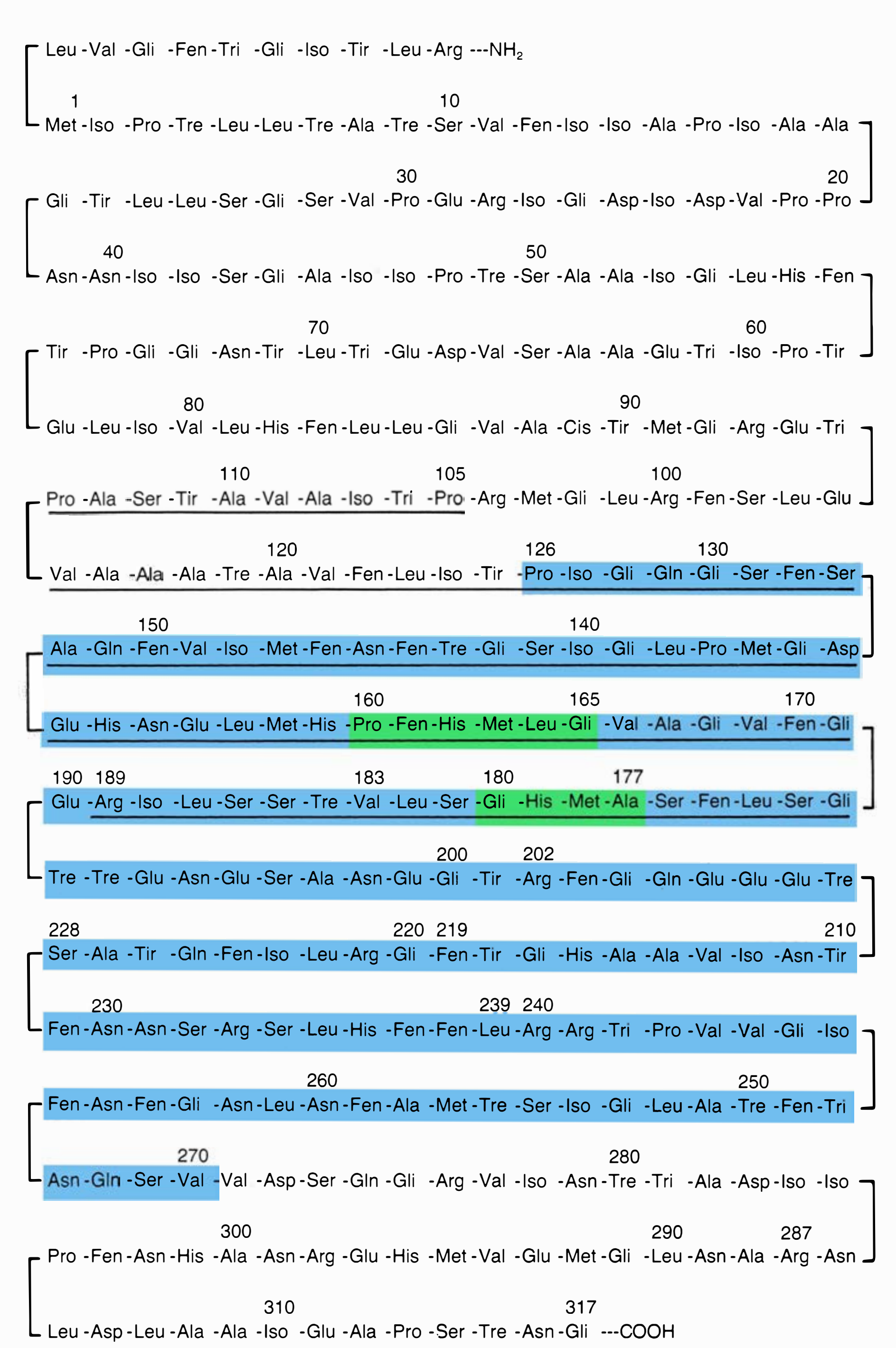
En cualquier caso, las investigaciones realizadas en torno a la competencia entre herbicidas parecen indicar que no todos los que intervienen en esta zona comparten el mismo lugar de anclaje en la proteína Q_B, y que dicha unión se desarrolla en más de un punto a la vez. Así, el DCMU y la atrazina comparten, por lo que parece, lugares comunes, amén del suyo específico. Los trabajos que venimos realizando en el departamento de bioquímica vegetal de la Estación Experimental del Zaidín, de Granada, han demostrado que el dinoseb, un herbicida nitro-fenólico, posee un punto de anclaje en la proteína receptora que no coincide plenamente con los del diurón o con los herbicidas triazínicos.

Una prueba adicional del mecanismo de acción propuesto tiene que ver con la existencia de variedades de malas hierbas (*Senecio, Amaranthus*) resistentes a las triazinas que, no obstante, siguen siendo susceptibles a la acción del diurón. Tales variedades manifiestan, por lo común, un transporte electrónico deficiente y, aunque contienen la misma proteína Q_B, exhiben cambios

puntuales en su estructura primaria, con sustitución de algún aminoácido por otro. Joseph Hirschberg y Lee McIntosh, de la Universidad de Michigan, han encontrado que la resistencia a la atrazina de biotipos de *Amaranthus hybridus* radica exclusivamente en la sustitución de la serina en posición 228 por un resto de glicocola, lo que delata una implicación directa de la serina en el lugar de anclaje del herbicida, o que este aminoácido condicione una estructura terciaria imprescindible para dicha unión. Investigaciones posteriores han confirmado la última hipótesis, tras comprobarse una zona de anclaje para la atrazina entre los aminoácidos 105 y 189. En este anclaje parecen hallarse también comprometidos otros tres aminoácidos: valina (en la posición 183), fenilalanina (en la 219) y leucina (239), cuya modificación confiere resistencia a los herbicidas.

El estudio de la síntesis proteica en semillas etioladas expuestas a la luz resolvió, en la década de los setenta, que uno de los principales productos que se formaban era un polipéptido de las membranas de peso molecular próximo a los 32 kilodalton. Ensayos posteriores llevados a cabo en cloroplastos mantenidos en obscuridad, e iluminados luego en presencia de S35-metionina, demostraron que el polipéptido sintetizado de inmediato exhibía el mismo comportamiento electroforético y suministraba idénticos fragmentos en la digestión tríptica que el polipéptido marcado por anclaje de la C14-azidoatrazina. Tratábase, por tanto, de una proteína de codificación cloroplastídica, no nuclear; es decir, no se transmitía por vía parental sino a través del precursor materno.

El gen que determinaba la proteína en cuestión se ha aislado ya. Conocido por *psbA*, su expresión aparece fuertemente inducida por la luz (fotogén). Se le ha secuenciado en distintas especies: espinaca, maíz, *Nicotiana debney, Amaranthus hybridus* y otras. El ADN del gen se transcribe en su correspondiente ARNm, y éste se traduce en un precursor de la proteína Q_B, cuyo peso molecular aproximado viene a ser de unos 34-35 kilodalton, correspondiente a unos 317 restos de aminoácidos; el precursor se procesa luego en polipéptido funcional de 32.000 dalton. Aunque algunos autores calculan para la proteína precursora un peso molecular de unos 39 kilodalton -correspondiente a 353 aminoácidos-, en razón de la secuencia nucleotídica del *psbA*, la diferencia estriba en que



6. ESTRUCTURA PRIMARIA DEL PRECURSOR DE LA PROTEINA Q_B de *Amaranthus hybridus*. Así se llama la mera secuencia de aminoácidos de que consta, 317. Posee un peso molecular de 34.600 dalton. Los 10 primeros aminoácidos del extremo terminal amino constituyen una traducción teórica de la correspondiente secuencia nucleotídica del gen *psbA*. No obstante, la traducción real de la proteína comienza con la metionina 1, correspondiente al codón ATG más acorde con el peso molecular determinado para dicha proteína precursora. La región en azul (de la prolina 126 a la valina 270) corresponde a una zona de alta homología entre las proteínas Q_B de distintos orígenes, mientras que las zonas en verde representan una total identidad secuencial entre las mismas (prolina 160-glicina 165; alanina 177-glicina 180). La estructura terciaria de Q_B condiciona una morfología en que la parte subrayada corresponde a la zona de anclaje. (Se llama estructura terciaria de una proteína a la forma que ésta adquiere tras el establecimiento de enlaces estables entre distintas zonas de la cadena polipeptídica.) Se indican, por último, zonas sensibles a la hidrólisis por tripsina (arginina 189, arginina 202 y arginina 287), o lugares donde el cambio de un aminoácido por otro confiere resistencia contra los herbicidas (valina 183, serina 228, fenilalanina 219 y leucina 239).

toman el primer triplete ATG (adenina-timina-guanina) como punto de traducción de la metionina inicial de la cadena polipeptídica, cuando parece más coherente que la traducción de la secuencia aminoacídica se inicie en el segundo triplete ATG, como única forma de justificación del peso molecular obtenido para el precursor. Entre ambos modelos media, pues, una discrepancia de 36 aminoácidos.

Desde una óptica filogenética adquiere especial interés el alto grado de conservación de la secuencia aminoa-

cídica de la proteína Q_B. El nivel de homología entre las proteínas de espinaca y de *A. hybridus* es del 97,2 por ciento, y el de ambas frente a la de *N. debneyi* alrededor del 95 por ciento. Estos datos reflejan, probablemente, la pertenencia de las dos primeras especies al orden de las Centrospermae, en tanto que haya que adscribir la tercera al de las Tubiflorae. Por lo que concierne a los biotipos de *A. hybridus* susceptibles y resistentes a la atrazina, sólo existen diferencias en tres zonas nucleotídicas; de éstas, dos son silenciosas y la tercera presenta un simple cambio, en la posición 228, de un resto de serina por otro de glicocola. La homología de la proteína Q_B de cianobacterias con relación a la de las plantas superiores es también del 96 por ciento, mostrándose virtualmente absoluta en la zona comprendida entre los aminoácidos 126 y 270, que encierra gran parte del fragmento 105-189, punto clave para el anclaje de la quinona transportadora o de los herbicidas del tipo DCMU, y abarca también a la serina 228, decisiva para el establecimiento de dicha unión.

A la proteína Q_B se la ha identificado también con el polipéptido D1, del que dijimos era intrínseco a las membranas. Más problemática resulta la naturaleza del polipéptido D2. Recientemente se ha secuenciado el gen *psbD*, que lo determina, corroborando que se trata de un polipéptido de 34 kilodalton, homólogo en un 60 por ciento a la proteína Q_B (D1). Lo mismo que ésta, se caracteriza por una manifiesta capacidad de enlace con las quinonas Q_A y Q_B, por cuya razón se ha sugerido que ambos polipéptidos intervendrían en el anclaje de las mismas.

En el análisis de estas relaciones de homología constituye un caso singular el de las bacterias purpúreas fotosintetizadoras (las *Rhodopseudomonas*, por ejemplo). Estos organismos poseen un solo fotosistema, asimilable en gran medida al fotosistema II de las plantas superiores, que aloja un centro de reacción con bacterioclorofila, amén de un aceptor primario del tipo bacteriofitina, aceptores secundarios quinónicos (ubiquinona y menaquinona), asimilables a los componentes Q_A y Q_B de plantas, y los polipéptidos intrínsecos L, M y H. Igual que ocurría en las plantas, el transporte de electrones en las bacterias resulta inhibido por DCMU y triazinas, siendo el polipéptido L el que queda marcado por la C14-azidoatrazina, aunque es el polipéptido M el que sirve de anclaje a la C14-azidoantraquinona, un análogo del aceptor secundario ubiquinona.

La secuenciación de los genes que determinaban los polipéptidos L y M puso de manifiesto un grado de homología en la cadena aminoacídica del 80 por ciento, mientras que la homología de ambos con la proteína Q_B de plantas superiores era del orden del 25 por ciento. Existen, empero, dos zonas de total coincidencia entre las proteínas Q_B, L y M, y son las correspondientes a los aminoácidos situados en las posiciones 160-165 (prolina, fenilalanina, histidina, metionina, leucina y glicina) y 177-180 (alanina, metionina, histidina y glicina); ambos segmentos se incluyen en la zona 126-270, que se caracteriza por su elevado grado de conservación en cianobacterias y plantas superiores, y en la zona de anclaje 105-189 de la quinona Q_B y herbicidas del tipo DCMU o triazinas.

El mantenimiento de estas homologías en organismos filogenéticamente tan lejanos, a lo largo de tres millones de años de evolución, dota a estas estructuras de una especial relevancia y pone de manifiesto su papel como lugar de anclaje del aceptor quinónico secundario. De los aminoácidos presentes en ambas, los mejores candidatos para constituirse en lugares de unión son los dipéptidos histidina-metionina y metionina-histidina. Apoyados en esas homologías, se ha sugerido que la subunidad L bacteriana funcionaría de manera análoga a como procede la proteína Q_B de los vegetales, sirviendo de lugar de enlace de la quinona convertida en aceptor secundario o de los herbicidas ureicos y triazínicos.

Cabría la posibilidad alternativa de que el polipéptido M fuera asimilable a la proteína D2, con una alta capacidad de anclaje en los aceptores quinónicos.

7. MODELO PENTAHELICOIDAL DE LA PROTEINA Q_B, que resulta ser coherente con todas las observaciones sobre accesibilidad de los lugares de anclaje de la quinona Q_B y herbicidas, resistencia contra estos últimos por modificaciones definidas de la estructura primaria y localización superficial de los restos de arginina que constituyen los lugares de actuación de la tripsina, una enzima hidrolítica. Los distintos aminoácidos vienen representados de la forma siguiente: glicocola (G), alanina (A), valina (V), leucina (L), isoleucina (I), serina (S), treonina (T), metionina (M), cistina (C), prolina (P), tirosina (Y), triptófano (W), ácido aspártico (D), ácido glutámico (E), asparagina (N), glutamina (Q), histidina (H) y arginina (R).

Estudios de difracción de rayos X revelan que los polipéptidos L y M, así como las proteínas D1 (Q_B) y D2, en cuanto constituyentes del núcleo del centro de atracción, presentan una estructura helicoidal quíntuple, que atraviesa la membrana entera. El polipéptido H se caracteriza por una situación más superficial, con un papel menos determinado.

Mohana Rao y Patrick Argos, de la Universidad de Purdue, habían postulado en 1983 que la proteína Q_B presentaba una estructura helicoidal de séptimo u octavo orden, pero estudios más detallados del grupo de Achim Trebst, del departamento de biología de la Universidad de Bochum, parecen efectivamente sugerir una hélice quíntuple, pudiendo yacer el error de los primeros en considerar como dos hélices adicionales lo que en realidad son conexiones entre las mismas.

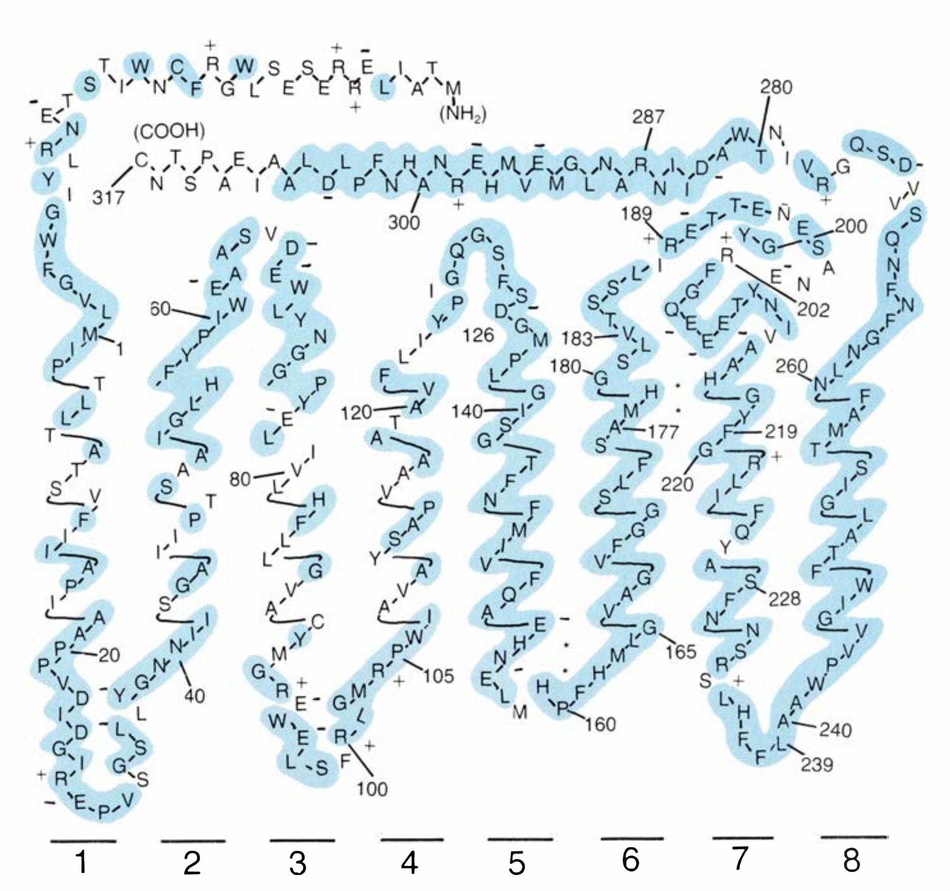
Además, y por lo que aquí nos interesa, el modelo de 7-8 hélices no explicaba todos los casos de resistencia a herbicidas. Dicha cualidad se adquiere con la modificación de la serina 238 y, también, con la de otros aminoácidos: valina 183, fenilalanina 219 y leucina 239, que en el modelo de Rao y Argos carecerían de localización superficial y no se hallarían expuestas para el anclaje de la quinona Q_B o los herbicidas. Por contra, ventaja del modelo de Trebst es que los cuatro aminoácidos citados se alojarían cerca de las parejas histidina-metionina y metionina-histidina, puntos de unión, según dijimos, de la quinona y del herbicida. Es más, de acuerdo con esta hipótesis aparecen tres argininas en las posiciones 189, 202 y 287, superficiales, que serían los lugares de actuación de la tripsina, lo que justificaría, asimismo, el tamaño molecular de los restos polipeptídicos originados en la digestión proteolítica.

La proteína Q_B presenta un recambio ("turnover") muy rápido, el mayor de las proteínas del cloroplasto. Esa alta capacidad de regeneración viene condicionada por una elevada concentración de ARNm para esta proteína. Esto tiene su explicación: la proteína Q_B sufre daños considerables durante el proceso del transporte electrónico, posiblemente en virtud de la alta reactividad de las formas semiquinona e hidroquinona del componente Q_B, bien por sí mismas o bien por interacción con radicales de oxígeno, muy reactivos, engendrados en el fotosistema II. Abona la segunda hipótesis el recambio, mayor en los organismos aerobios que en las bacterias anaerobias fotosintetizadoras. Se supone que quizá los lugares probables de unión de la quinona Q_B, los pares histidina-metionina y metionina-histidina antes mencionados, quedaran oxidados, con la correspondiente pérdida de funcionalidad de la proteína y la necesidad imperiosa de su nueva síntesis. Ello implicaría un daño proporcional al ritmo del flujo electrónico que, a su vez, depende del grado de iluminación, y justificaría la necesidad de luz para la inducción de la síntesis de la proteína. No sabemos todavía de qué modo se expulsa de las membranas la proteína dañada.

Así pues, la investigación básica de la estructura y función de la proteína Q_B permite ahondar en el proceso del transporte electrónico de la fotosíntesis (transportadores implicados, conformación del centro de reacción de las bacterias fotosintetizadoras y del fotosistema II de las plantas, polipéptidos receptores, etcétera), en el establecimiento de relaciones filogenéticas y taxonómicas entre organismos fotosintetizadores y en un mayor conocimiento de las relaciones de estructura y función de la membrana fotosintetizadora.

Por otro lado, desde la perspectiva de la aplicación agronómica, los estudios moleculares de la proteína Q_B conducirán a un cabal diseño de biotipos resistentes a herbicidas. Se espera con ello sustituir los herbicidas específicos de las malas hierbas e inocuos para el cultivo por la creación de nuevas variedades vegetales resistentes a los pesticidas. El alto grado de conservación evolutiva de la proteína Q_B posibilitará el empleo de procariotas fotosintetizadores, más accesibles a la manipulación genética para el clonaje, modificación y transferencia a plantas superiores, mediante técnicas de ADN recombinante, del material genético afecto a la proteína Q_B, de suerte que se induzca en éstas la resistencia a los herbicidas, muy extendidos en la práctica agronómica actual.

Así como el advenimiento de los herbicidas de síntesis significó la superación de la escarda manual y otras formas rudimentarias de lucha contra las malas hierbas, la ingeniería genética se perfila en el sentido expuesto como forma de racionalización de la actual industria de síntesis de herbicidas, tan empírica en numerosos aspectos.



8. MODELO HEPTA-OCTOHELICOIDAL DE LA PROTEINA Q_B, que no satisface ciertos datos experimentales, como la accesibilidad de determinados aminoácidos cuya modificación confiere resistencia contra los herbicidas. En el modelo de la ilustración se observa un resto adicional de 36 aminoácidos en el extremo terminal amino (NH_2) de la cadena, que es consecuencia de considerar un triplete ATG anterior de la cadena de ADN del gen *psbA* como el punto inicial de traducción del polipéptido precursor de la proteína Q_B.



Síntesis cósmica de litio, berilio y boro

Estos tres elementos ligeros, que no pueden resistir la violencia del entorno estelar en el que se crearon la mayoría de los elementos, resultan del choque de rayos cósmicos contra nubes de gas y polvo que impregnan la galaxia

Victor E. Viola y Grant J. Mathews

La mayoría de los elementos que forman el Sistema Solar surgieron en el transcurso de la evolución estelar. El proceso empezó hace miles de millones de años, cuando se condensaron nubes de materia primigenia para constituir estrellas jóvenes. En el interior de esos hornos estelares, se fusionaron el hidrógeno y otros elementos ligeros para formar núcleos más pesados. Y los elementos pesados fueron arrojados al espacio durante el cataclismo de una supernova (la explosión de una estrella masiva) o en la muerte de una gigante roja, la clase de estrella en que se convertirá el Sol dentro de unos cinco mil millones de años. Luego, el ciclo empezó de nuevo con el nacimiento de una estrella de segunda generación que era más rica en su composición de elementos.

Sin embargo, y a pesar de su éxito, esta teoría se muestra incapaz de explicar la existencia de tres elementos ligeros: el litio, el berilio y el boro. Los núcleos de estos elementos, que contienen tres, cuatro y cinco protones respectivamente, son de extrema fragilidad y se desintegrarían en seguida en el interior caliente, denso y violento de la mayoría de estrellas. De hecho, cualquier cantidad de litio, berilio o boro que hubiera inicialmente en el núcleo de una estrella recién formada se destruiría a medida que la estrella se contrayera y se calentara. ¿Cómo aparecieron, pues, esos tres elementos? Durante mucho tiempo, la pregunta ha sido de difícil solución.

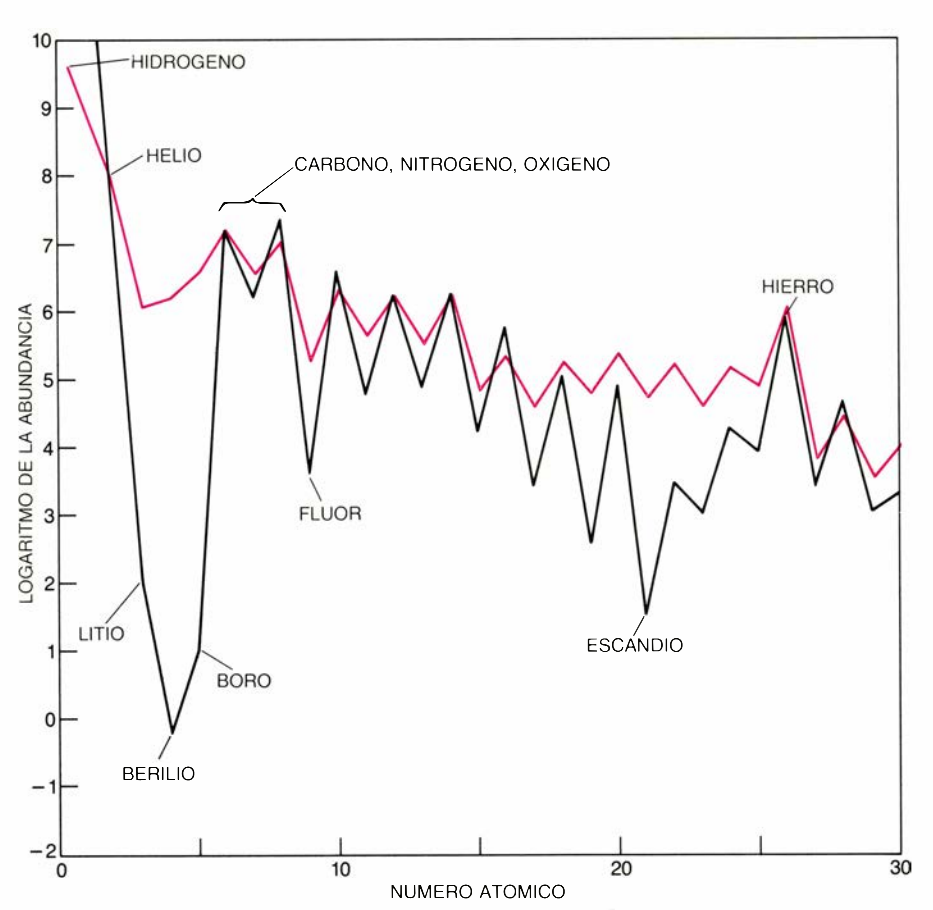
El trabajo en común de la astrofísica teórica y la física nuclear experimental de energías bajas y medias ha empezado a elaborar ya una respuesta. De acuerdo con esa investigación conjunta, el litio, el berilio y el boro se sintetizaron, probablemente, fuera de los interiores estelares, en las inmensas nubes de gas y polvo de baja densidad que impregnan el espacio interestelar de nuestra galaxia. Las nubes constituyen el llamado medio interestelar. Los rayos cósmicos, que constan principalmente de protones de alta energía, en su travesía por el medio interestelar, a lo largo de los últimos 10.000 o 15.000 millones de años, han desencadenado las reacciones nucleares que producen los tres elementos ligeros. Una fracción notable de uno de los elementos, el litio, parece también haberse producido en la génesis nuclear asociada a los primeros instantes de la expansión cósmica durante la gran explosión ("big bang"): la explosión primordial, de la que se supone surgió el universo hace unos 15.000 millones de años.

La escasez relativa de litio, berilio y boro —la cuantía de cada uno de ellos no llega a la milmillonésima parte del elemento preponderante en la naturaleza, el hidrógeno, y es muchos órdenes de magnitud inferior a la del helio, el carbono, el nitrógeno y el oxígeno— no se corresponde con su importancia. El origen singular de los tres elementos los ha convertido en intérpretes valiosísimos de la historia del universo. Con la acumulación de información que han venido suministrando los experimentos de laboratorio donde se simulaba su producción en la naturaleza, los modelos de la síntesis cósmica de estos elementos están adquiriendo la precisión suficiente para encauzarnos en el desciframiento del destino final del universo. Los datos pueden ayudar a resolver la cuestión de si el universo se expandirá ilimitadamente o terminará por colapsar de nuevo en otra bola caliente y densa de partículas.

La interacción entre los rayos cósmicos y el medio interestelar se ha convertido en la explicación más plausible de cuantas se han esgrimido para dar cuenta de la síntesis cósmica del litio, el berilio y el boro. Unos 30 años atrás, E. Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William A. Fowler y Fred Hoyle, que trabajaban entonces en el Instituto de Tecnología de California, señalaron que la frágil naturaleza de los tres elementos delataba su síntesis en un medio de escasa densidad, donde las temperaturas, suficientemente bajas, evitarían que los núcleos se fragmentaran después de su formación. Y postularon que el "proceso x", del que no daban una definición precisa, constituía la fuente de los tres elementos. De acuerdo con su hipótesis los elementos podían haberse formado en reacciones nucleares relacionadas con la fragmentación de núcleos pesados tras colisionar con núcleos ligeros energéticos, en un entorno de baja densidad.

Tal entorno podía haber sido, por ejemplo, la superficie del recién formado Sol, o la superficie de otras estrellas jóvenes, durante una época temprana de intensa actividad eruptiva. Otro posible entorno podía haber sido la envoltura exterior de gas y de materia condensada que rodeó al Sol cuando el Sistema Solar comenzaba a formarse, según propusieron Fowler, Jesse L. Greenstein, Donald S. Burnett y Hoyle en una serie de trabajos publicados entre 1962 y 1965. La envoltura exterior habría abundado en carbono, nitrógeno y oxígeno. Durante

1. GRAN NEBULOSA de la constelación de Orión. Podría ser muy bien un lugar idóneo donde se sintetizara litio, berilio y boro. Una nube interestelar recibe luz de estrellas de formación más reciente, situadas detrás. Se cree que, cuando los rayos cósmicos energéticos atraviesan las nubes de gas y polvo de la galaxia, sufren reacciones nucleares que producen los tres elementos. (Fotografía tomada en el Observatorio de Kitt Peak.)



2. ABUNDANCIA DE LOS DISTINTOS ELEMENTOS, relativa al Sistema Solar (*color negro*) y a los rayos cósmicos de alta energía (*rojo*). El litio, el berilio y el boro abundan más en los rayos cósmicos.

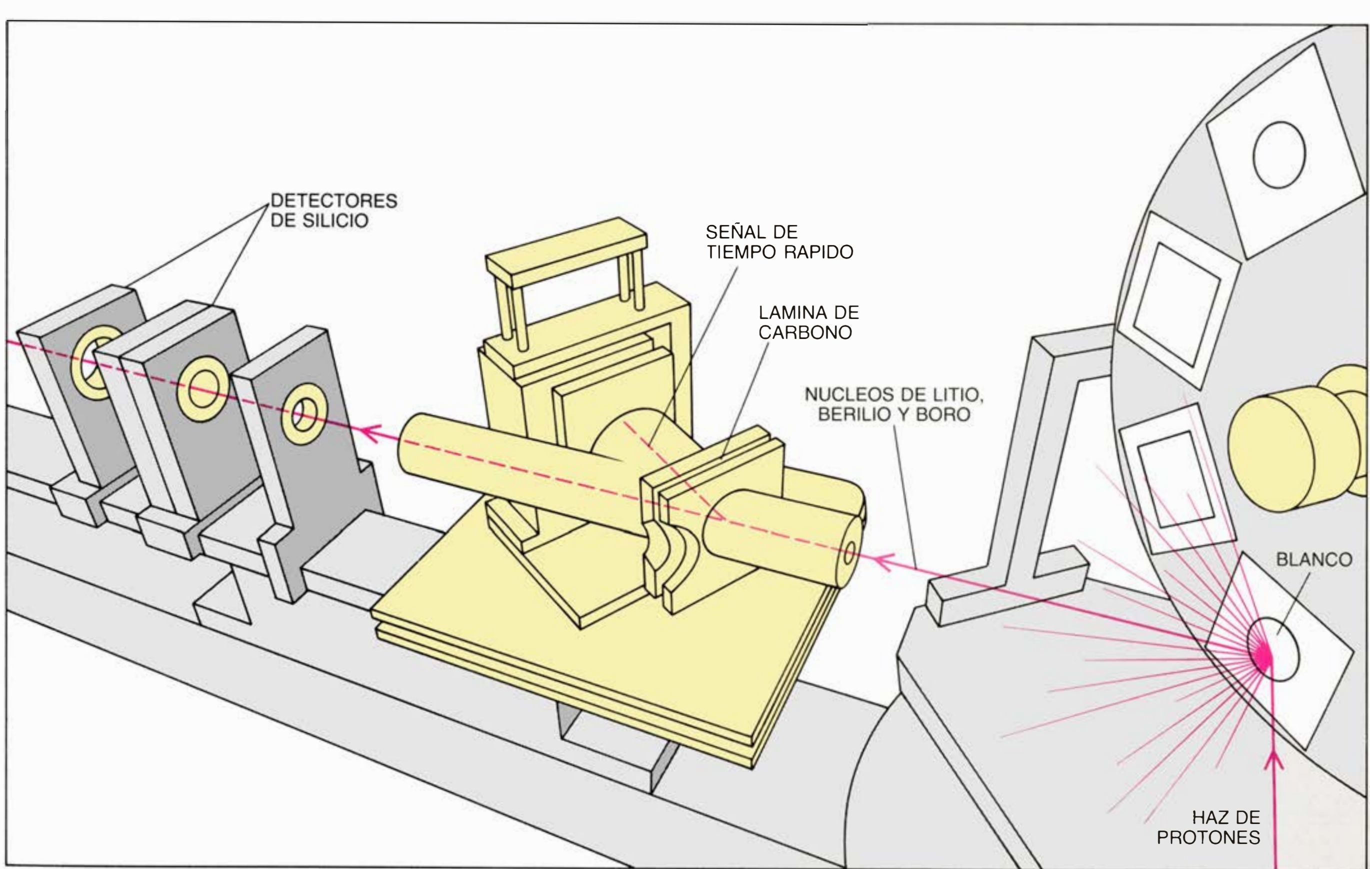
una fase precoz de actividad eruptiva energética, protones y partículas alfa (núcleos de helio-4, que constan de dos protones y dos neutrones) podían haberse acelerado hasta alcanzar energías de intensidad suficiente para fragmentar los núcleos más pesados de la envoltura exterior y producir litio, berilio y boro. Por ser la superficie estelar y la envoltura exterior mucho más frías que el interior solar, los productos de la reacción habrían sobrevivido y se habrían incorporado en el Sistema Solar.

Cuando se propuso, el modelo parecía bastante plausible, desde el punto de vista de las abundancias relativas de los elementos y de las probabilidades de algunas reacciones nucleares. Pero no tardaron en verse sus puntos débiles: la aceleración de protones y partículas alfa a velocidades suficientemente altas para crear hasta la mínima cantidad de litio, berilio y boro presentes en la naturaleza requería una fracción significativa de la energía gravitacional total del Sol.

En los años setenta, reconociendo las dificultades del modelo, Hubert Reeves, del Instituto de Astrofísica de París, Fowler y Hoyle sugirieron el mecanismo de los rayos cósmicos. Ciertas consideraciones hicieron que la propuesta ganara en interés desde un comienzo. En primer lugar, las abundancias de litio, berilio y boro en el espectro de los rayos cósmicos galácticos multiplicaban un millón de veces las concentraciones interestelares normales. Las cuantías de los rayos cósmicos se conocían desde finales de los años cincuenta, cuando Phyllis S. Freier, Cecil J. Waddington y sus colaboradores, de la Universidad de Minnesota y de la Universidad de Bristol, lograron medirlas con equipos instalados en sondas enviadas a grandes altitudes. En segundo lugar, como indicó Sam M. Austin, de la Universidad estatal de Michigan, la producción de litio, berilio y boro es inevitable, dadas las energías e intensidades conocidas de los rayos cósmicos galácticos y la actual composición y densidad del medio interestelar. Además, si la interacción entre los rayos cósmicos y el medio interestelar se ha venido produciendo sin solución de continuidad durante la vida de la galaxia (unos 10.000 millones de años), ha transcurrido el tiempo necesario para sintetizar los tres elementos.

La atracción que ofrece el mecanismo de los rayos cósmicos no ha impedido que se siguieran proponiendo otras teorías. El litio, el berilio y el boro podrían haberse producido durante una supernova, de acuerdo con lo postulado por Stirling A. Colgate, del Laboratorio Nacional de Los Alamos. Durante un episodio de supernova, las partes interiores de una estrella dotada de gran masa implosionan para formar una densa estrella de neutrones, mientras que las regiones exteriores explotan generando una nebulosa, o nube de gas y polvo, circundante [véase "Así explota una supernova", por Hans A. Bethe y Gerald Brown; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1985]. A medida que la onda de choque de la implosión va atravesando las capas exteriores de la estrella, podría crearse litio, berilio y boro. Thomas A. Weaver y George F. Chapline, Jr., del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, han demostrado, sin embargo, que este cuadro hipotético resulta poco probable, toda vez que la temperatura existente detrás mismo de la onda de choque podría ser muy baja e insuficiente para producir las partículas energéticas necesarias en la síntesis de los tres elementos. Podrían proponerse también otros lugares de formación; por ejemplo, regiones del entorno de púlsares recién constituidos, regiones densas de núcleos galácticos activos y zonas cercanas a quásares: galaxias que arrojan chorros de partículas de alta energía al espacio.

Al objeto de determinar la validez de los distintos mecanismos propuestos para la nucleosíntesis del litio, el berilio y el boro, podría pensarse en analizar todas las posibles colisiones nucleares que producen los tres núcleos en un entorno astrofísico dado. Si tenemos en cuenta el centenar de elementos de la tabla periódica esto sería un trabajo monumental. Por fortuna para nosotros basta con considerar los elementos más abundantes y las probabilidades de que estos elementos interaccionen para producir los elementos ligeros. En consecuencia, el problema puede reducirse a un conjunto bastante pequeño de reacciones nucleares. Los análisis indican que las reacciones de protones y partículas alfa de los rayos cósmicos con otras partículas alfa y con los núcleos de carbono 12, nitrógeno 14 y oxígeno 16, dominan la producción de litio, berilio y boro en todos los modelos de síntesis propuestos. (El número que sigue a cada elemento representa el número total de protones y neutrones del núcleo. Los elementos que tienen el mismo número de protones y diferente número de neutrones se llaman isótopos; por ejemplo, el carbono 12 y el carbono 14 son isó-



3. APARATO DISEÑADO POR LOS AUTORES (*arriba*) **en el ciclotrón de la Universidad de Indiana para determinar los productos de colisiones nucleares de energía media. Las colisiones se provocan generando un haz de protones o de núcleos de helio en un acelerador y dirigiéndolo contra un blanco fijo que contiene helio, carbono, nitrógeno u oxígeno** (*diagrama inferior*)**. Cuando las partículas emergen de las colisiones atraviesan una lámina de carbono** (*centro*)**. Las partículas arrancan de la lámina electrones que ponen en marcha un reloj de precisión. El reloj se para al llegar las partículas a un detector de silicio** (*izquierda*)**. El detector mide también las energías de las partículas. Conociendo la energía de una partícula y lo que tarda en el viaje, determinaremos su masa.**

topos; el carbono 14 tiene dos neutrones más que el carbono 12.)

Aunque la abundancia relativa de los elementos se conoce bastante bien desde hace años, el conocimiento de las probabilidades de reacción nuclear necesario para someter a prueba los distintos modelos ha sido sólo fragmentario hasta hace poco. Debíase ello, en buena parte, a la dificultad de medir los productos de reacción interesantes y a la falta de aceleradores de partículas nucleares que completaran el intervalo de energías de bombardeo apropiadas para los distintos mecanismos de producción.

En los últimos 15 años, los grandes esfuerzos experimentales realizados en varios laboratorios han permitido establecer todas las probabilidades de reacción que eran relevantes para el problema. En la década de los setenta, Austin y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Michigan, y David D. Bodansky y William W. Jacobs, de la Universidad de Washington, llevaron a cabo, cada grupo por su cuenta, importantes estudios de bajas energías. Sus resultados sirven como datos de entrada esenciales para cifrar la producción de litio, berilio y boro en los rayos cósmicos de baja energía, las ondas de choque de supernovas y las actividades eruptivas en las protoestrellas, entre otros fenómenos. A energías más altas, donde los datos importan para la síntesis por rayos cósmicos galácticos energéticos, han recogido abundante información Grant Raisbeck y F. Yiou, del Laboratorio René Bernas de Orsay, Harry H. Heckman y sus colaboradores, del Laboratorio Lawrence en Berkeley, y nuestro grupo de la Universidad de Indiana, Universidad de Maryland y Laboratorio Livermore. Gracias a estos estudios sistemáticos ha sido posible realizar una valoración cuantitativa de las distintas teorías en torno a la nucleosíntesis del litio, el berilio y el boro.

No es fácil acometer las mediciones necesarias, como bien saben quienes investigan las probabilidades de reacción nuclear que tienen significación en astrofísica. Aunque los estudios del litio, el berilio y el boro no requieren el empeño exigido en las mediciones de flujos de neutrinos solares o de reacciones entre protones en los ciclos de combustión estelar, sí precisan el dominio de técnicas muy refinadas para obtener los datos experimentales necesarios. En el laboratorio se simula el entorno de la nucleosíntesis astrofísica mediante colisiones desencadenadas por un haz de protones o de partículas alfa provenientes de un acelerador. El haz de partículas se dirige contra un blanco fijo que contiene helio, carbono, nitrógeno u oxígeno. Las energías de las partículas aceleradas deben incrementarse desde unos millones de electronvolt hasta varios miles de millones de electronvolt, a fin de reproducir la gama de partículas energéticas que se asocia con las erupciones, las ondas de choque y los rayos cósmicos galácticos; por cuya razón se han empleado varios tipos de aceleradores, incluidos tándems de generadores de Van der Graaff, ciclotrones y sincrotrones.

La medición experimental de la probabilidad de producción de litio, berilio y boro en reacciones nucleares tropieza con un grave problema: los tres elementos suelen surgir de reacciones de poca energía y son, por tanto, difíciles de identificar. Una de las técnicas más fructíferas desarrolladas para identificar tales partículas de baja energía uti-

PROTON
HELIO 4
HELIO 4
LITIO 6
NEUTRON
CARBONO 12
BORO 11
NITROGENO 14
BERILIO 9
CARBONO 12
LITIO 7
NITROGENO 14
BORO 10

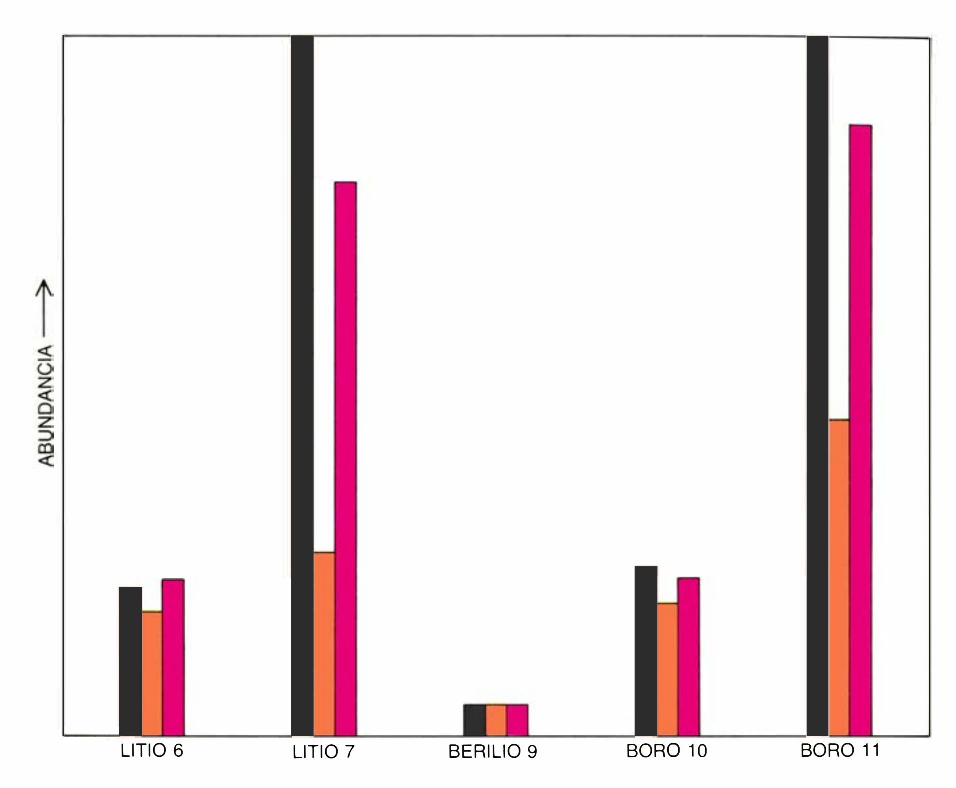
4. INTERACCIONES ENTRE LOS RAYOS COSMICOS y el medio interestelar. Se han simulado en aceleradores de partículas. Las reacciones nucleares que se muestran aquí ilustran algunas de las que pueden producir litio, berilio y boro en el espacio profundo. No se ofrecen las reacciones en las que el oxígeno 16, el neón 20, el silicio 28 y el hierro 56 se utilizan como blanco. (Los esquemas han sido realizados por Gabor Kiss.)

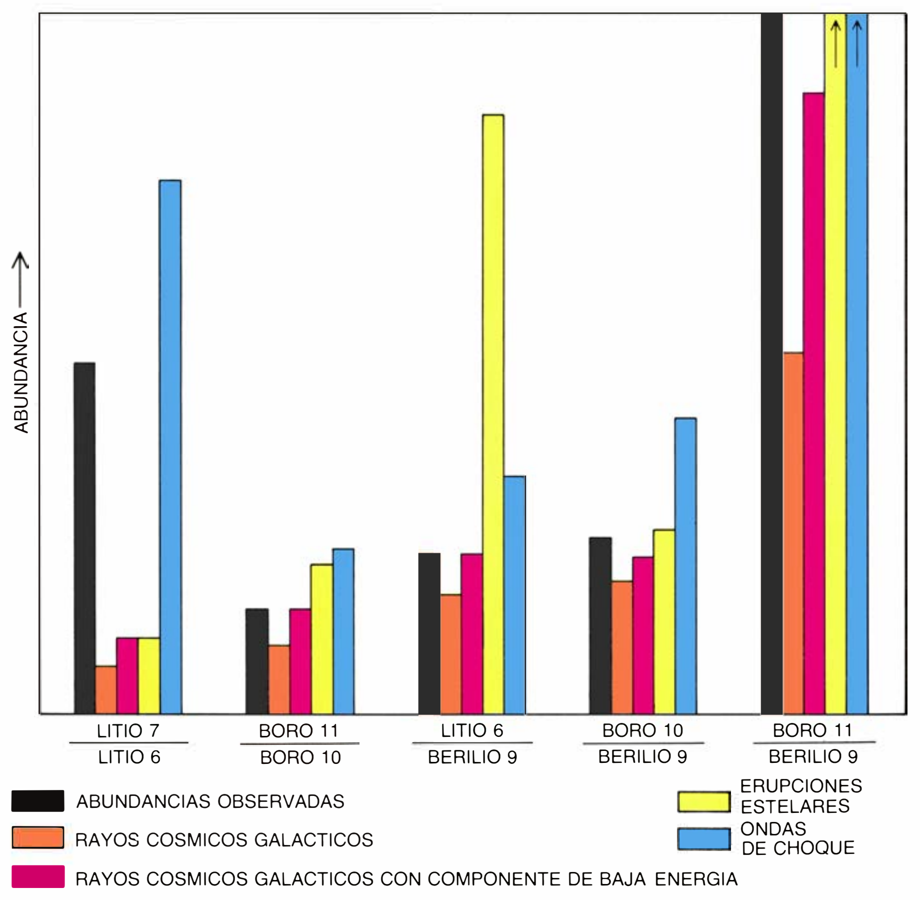
liza una fina lámina de carbono (de un espesor aproximado de una diezmillonésima de metro, es decir, 750 veces más delgada que el cabello humano) y un detector de silicio semiconductor. La lámina se coloca en la trayectoria de los fragmentos emitidos por el blanco; el detector, a unos 20 o 30 centímetros más allá de la lámina. Cuando los fragmentos atraviesan la lámina expulsan electrones que ponen en marcha un reloj de precisión. Este se detiene en cuanto los fragmentos llegan al detector de silicio. El detector mide también las energías de las partículas. Conociendo la energía de una partícula y lo que tarda en recorrer la distancia entre la lámina y el detector, resulta bastante fácil calcular la masa de la partícula y, por tanto, identificarla.

Tales mediciones sistemáticas han permitido recoger toda una serie de probabilidades de reacción en función de la energía de bombardeo para reacciones inducidas por protones y partículas alfa con helio 4, carbono 12, nitrógeno 14 y oxígeno 16. Las probabilidades se utilizaron después como parámetros de entrada en cálculos diseñados para comprobar los distintos modelos de nucleosíntesis de litio, berilio y boro. Los cálculos indican que los modelos de erupciones y ondas de choque no logran reproducir las abundancias observadas de los tres elementos. El modelo de rayos cósmicos, en cambio, tiene bastante éxito.

Gran parte del trabajo llevado a cabo para proporcionar los detalles del modelo de rayos cósmicos debióse a Maurice Meneguzzi y Jean Audouze, del Instituto francés de Astrofísica, a Reeves e, independientemente, a Henry E. Mittler, entonces en el Centro Smithsoniano de Astrofísica Teórica de Harvard. Según el modelo, los rayos cósmicos que recorren la galaxia producen litio, berilio y boro cuando chocan con los núcleos más pesados del medio interestelar.

Se han atribuido distintas fuentes para los rayos cósmicos: ondas de choque de plasmas colisionantes, supernovas y púlsares. Se trata de una cuestión todavía abierta [véase "Rayos cósmicos de Cisne X-3", de P. Kevin MacKeown y Trevor C. Weekes; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1986]. Cualquiera que sea la fuente, el flujo observado de rayos cósmicos recibe una descripción adecuada mediante una función exponencial decreciente de la energía relativista total de las partículas, que es igual a la suma de la masa y la energía cinética de cada partícula.



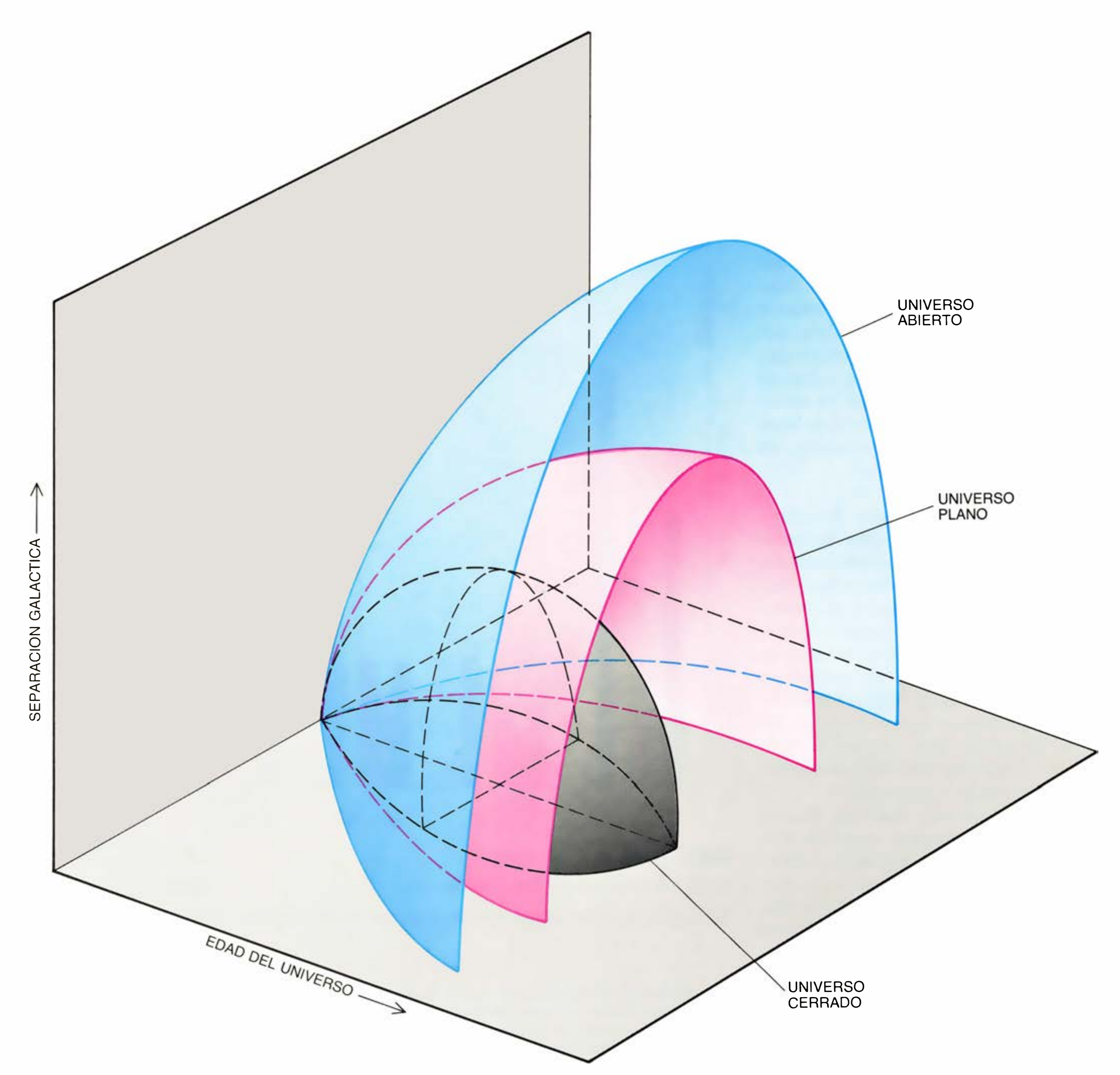


5. ABUNDANCIAS PREDICHAS de litio, berilio y boro por los tres modelos teóricos, y su comparación con las abundancias observadas. De acuerdo con los datos, lo más plausible sería que los tres elementos se produjeran durante las interacciones entre los rayos cósmicos galácticos y el medio interestelar: las nubes de gas y polvo de baja densidad que hay entre las estrellas. Menos probables parecen aquellos escenarios donde los elementos se sintetizan durante erupciones estelares u ondas de choque de una supernova (la explosión de una estrella de gran masa), por ejemplo. El fracaso del modelo de rayos cósmicos en la predicción precisa de la cantidad de litio 7 (*arriba*) se hace patente al incluir los efectos de la gran explosión; se cree que se produjo abundante litio 7 en el nacimiento del universo. La discrepancia en la razón de boro 11 a boro 10 (*abajo*) puede paliarse si introducimos en el modelo una componente de rayos cósmicos de baja energía.

En el espectro puede haber, además, una componente de baja energía. En su versión más sencilla, el modelo supone que la composición y el espectro de energías de los rayos cósmicos han permanecido constantes a lo largo de los 10.000 o 15.000 millones de años de vida de la galaxia. La hipótesis ha resultado ser una aproximación sorprendentemente buena.

La formación del litio, el berilio y el boro puede producirse de dos maneras. Los rayos cósmicos ligeros (protones y partículas alfa) pueden interaccionar con núcleos pesados (carbono, nitrógeno y oxígeno) en el medio interestelar, y los rayos cósmicos pesados hacerlo con núcleos ligeros en dicho medio. En ambos casos, debe tenerse en cuenta la capacidad del medio interestelar para retener los productos de la reacción. A pesar de la densidad del medio interestelar, infinitésimamente baja, los rayos cósmicos atraviesan distancias tan largas que resulta bastante probable que se desarrollen reacciones nucleares. En el caso de las reacciones producidas por los rayos cósmicos ligeros sobre núcleos pesados, la mayor parte del litio, berilio y boro generados queda incorporada en el medio interestelar. En el caso de las reacciones inducidas por rayos cósmicos pesados sobre núcleos ligeros la mayor parte de los tres elementos entra en la composición de los rayos cósmicos. Esto explica la elevada abundancia de litio, berilio y boro en los rayos cósmicos.

La verdad es que la elevada concentración de los tres elementos en los rayos cósmicos se ha convertido en uno de los indicadores más importantes del entorno que encuentran los núcleos de los rayos cósmicos al recorrer la gala-



6. EL DESTINO DEL UNIVERSO depende de su actual densidad de masa. El universo se halla en expansión. Si la densidad de masa es menor que aquella para la cual la fuerza gravitatoria detendría la expansión, el universo será abierto: se expandirá para siempre. Si la densidad de masa es tan grande que la energía potencial gravitatoria supera la energía de expansión, nos encontraremos en un universo cerrado: detendrá su expansión y colapsará finalmente en una bola caliente y densa de partículas fundamentales. Si la densidad de masa produce una energía potencial gravitatoria que iguale a la energía de expansión, nos hallaremos ante un universo plano. Los datos relativos al litio 7 sugieren un universo abierto, pero el problema se encuentra todavía lejos de estar resuelto.

xia. En particular, las abundancias relativas de los elementos sirven para medir la cantidad de materia interestelar que los rayos cósmicos han atravesado antes de alcanzar la Tierra; cuanta más cantidad de materia atraviesen los rayos cósmicos, mayor será la proporción de litio, berilio y boro producida. La presencia en los rayos cósmicos de núcleos radiactivos —piénsese en el berilio 10— puede emplearse incluso para inferir el tiempo de permanencia de los rayos cósmicos formando parte del entorno galáctico antes de escapar de la galaxia o de autodestruirse en colisiones: unos 10 millones de años.

Merece destacarse que el modelo de rayos cósmicos, en su sencillez, conduce a predicciones de las abundancias absolutas de litio 6, berilio 9, boro 10 y boro 11 que se acercan, desde el punto de vista cuantitativo, a las abundancias observadas. La similitud impone valiosas restricciones sobre la evolución de la galaxia. En concreto, parecen excluidas cantidades entrantes excesivas de materia primordial extragaláctica, así como grandes variaciones en la historia de la actividad de rayos cósmicos, pues tales efectos habrían provocado, a buen seguro, desviaciones significativas de las predicciones del modelo de rayos cósmicos. La conclusión está sustentada por numerosos datos recolectados y relativos a los elementos ligeros (especialmente del berilio, que es el más fácil de medir) sobre la superficie de estrellas viejas, según indicaran ya Jean-Paul Meyer, del Servicio francés de Astrofísica, y Reeves. (La materia interestelar se incorporó en las estrellas cuando éstas se condensaron por primera vez.) Las estrellas, algunas casi tan viejas como la propia galaxia, constituyen auténticos "archivos históricos" de la producción de litio, berilio y boro.

A partir de las observaciones, se concluye que la abundancia de núcleos de berilio no ha cambiado en más de un factor dos durante los últimos 10.000 millones de años, tras un temprano periodo de crecimiento. La inferencia implica que la producción de rayos cósmicos de los elementos ligeros ha sido más o menos constante durante la historia de la galaxia. Entra, sin embargo, dentro de lo probable que haya acontecido alguna dilución de los elementos en virtud del efecto combinado de la expulsión por las estrellas de material con el berilio agotado y de la incorporación de materia extragaláctica.

A pesar del éxito del modelo de rayos cósmicos en su explicación de la formación de los tres elementos ligeros, presenta dos limitaciones. En primer lugar, y aunque el modelo da cuenta bastante bien de la cuantía absoluta de boro 10 y boro 11, no logra justificar la razón de boro 11 a boro 10, que se conoce con un grado de exactitud mucho mayor que las abundancias absolutas. En concreto, el valor predicho para ese cociente es de 2,5, mientras que el valor medido está en torno a 4,05. En segundo lugar, el modelo predice que debería haber 10 veces menos litio 7 que lo observado.

El fallo del modelo de rayos cósmicos en la predicción exacta de la razón de boro 11 a boro 10 suele atribuirse a un escaso conocimiento acerca de cuántas partículas de baja energía se encuentran en los rayos cósmicos. La intensidad de la radiación cósmica de baja energía no se conocerá realmente hasta que los satélites obtengan mediciones del espacio profundo, a distancias superiores a un centenar de veces la que media entre la Tierra y el Sol.

La sonda espacial más profunda, el *Pioneer 10*, que abandonó recientemente el Sistema Solar y se halla ahora a unas 40 veces la distancia Tierra-Sol, ha encontrado ya ejemplos de flujos inesperados de partículas de baja energía; entre éstos, intensos campos de radiación en torno a Júpiter. Sin embargo, la nave espacial debe viajar más allá del largo alcance de la influencia del campo magnético solar antes de poder observar el verdadero espectro de rayos cósmicos galácticos de baja energía. Si se demuestra correcta la hipótesis de intensos flujos de baja energía de rayos cósmicos interestelares, resultaría plausible que los rayos cósmicos de muy baja energía formaran el boro 11 adicional necesario para dar la proporción correcta entre boro 11 y boro 10 sin modificar el resto de la teoría.

La anomalía del litio 7 admite una explicación cuantitativa si se incluyen en el modelo los efectos de la gran explosión. De acuerdo con los cálculos realizados por Robert V. Wagoner, de la Universidad de Stanford, Fowler y Hoyle, la gran explosión podría haber producido la cantidad de litio 7 adecuada para justificar la abundancia de este elemento en la naturaleza. Sin embargo, esta afirmación entraña una dificultad. F. Spite y M. Spite, del Observatorio de París-Meudon, acaban de hacer pública la concentración de litio en la superficie de las estrellas de halo, viejas y exteriores al disco de la galaxia. Si la cuantía no se ha modificado a lo largo de la evolución de las estrellas, podría tratarse de la abundancia dejada por la gran explosión.

Pero la concentración de litio que se ha medido en las estrellas de halo viene a corresponder sólo al 10 por ciento de la medida en las estrellas del disco galáctico. Y sigue siendo cuestión debatida si la baja abundancia de litio representa o no el material primordial de la gran explosión. En la hipótesis afirmativa, deberá encontrarse otra fuente para la mayor parte del litio 7 que se observa en la galaxia. Cabe la posibilidad de que tal fuente se hallara en las estrellas gigantes rojas, o incluso en las explosiones de supernovas, tal como han sugerido A. G. W. Cameron, del Centro Smithsoniano de Harvard, y Fowler. Debe indicarse que, aun cuando hubiera otra fuente para el litio 7, es poco probable que afecte a la validez del modelo de rayos cósmicos.

¿Qué consecuencias sacar de las abundancias de los elementos ligeros para explicar el universo en su conjunto? La concentración de deuterio (hidrógeno 2), helio 3, helio 4 y litio 7 producidos en la gran explosión dependen, principalmente, de la densidad de bariones que hubiera en el momento de la síntesis; los bariones forman una clase de partículas cuyos miembros más importantes son el protón y el neutrón. Las respectivas cuantías pueden utilizarse para deducir, por tanto, la densidad inicial de bariones del universo. Una vez inferida esa densidad inicial, puede calcularse la densidad actual de bariones del universo.

La densidad de masa total del universo calculada se suele expresar con un parámetro adimensional que se designa con la letra griega omega. Omega es la razón entre la densidad calculada y la densidad crítica del universo: la densidad mínima para que la fuerza gravitatoria detenga la actual expansión del universo. Si omega es menor que 1, se dice que el universo es abierto, y se expandirá para siempre. Si omega es mayor que 1, el universo es cerrado y acabará por contraerse. Si omega es igual a 1, el universo continuará expandiéndose, pero a un ritmo que irá decreciendo asintóticamente.

En la estimación de la densidad inicial de bariones y, por tanto, en el valor de omega, intervienen, de una manera destacada, la cuantía de deuterio y litio 7. La producción de deuterio en la gran explosión cae rápidamente al aumentar la densidad. Para el litio 7 ocurre al revés. Ajustando las abundancias observadas de deuterio y litio 7 a las predicciones de la teoría de la nucleosíntesis de la gran explosión, puede lograrse una estimación bastante precisa de la densidad de bariones del universo.

El análisis del cociente entre litio 7 y deuterio indica que omega es menor o igual que 0,05, lo que implica un universo abierto. El resultado viene a equivaler a lo que los astrónomos han deducido partiendo de los movimientos de las galaxias. Hay muchas razones, sin embargo, para cuestionar que el universo sea realmente abierto. La primera de ellas: la teoría dominante se inclina fuertemente hacia un valor de omega igual a 1 [véase "El universo inflacionario", de Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984]. Si omega es igual a 1, debe darse cuenta de la masa que falta, la masa oscura que elude la detección de los observadores y de los instrumentos. Para mantener la coherencia con los resultados de los cálculos de nucleosíntesis en la gran explosión, se suele suponer que esa materia debe diferir algo de los bariones. Se han propuesto muchos candidatos [véase "Materia oscura del Universo", de Lawrence M. Krauss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1987].

Pero queda todavía la posibilidad de que la materia oscura, si existe, sea de bariones. Uno de los autores (Mathews) junto con sus colaboradores en el Laboratorio Livermore y varios investigadores de otras instituciones han empezado a explorar, minuciosamente, las posibilidades de que tal materia oscura se haya formado en el caso de que la densidad de bariones del universo no hubiera sido homogénea durante la gran explosión. La materia oscura bariónica residiría en zonas que han colapsado en remanentes invisibles, tales como los agujeros negros. El marco interpretativo podría seguir siendo coherente con la nucleosíntesis de los elementos ligeros en el marco de la gran explosión.

Aunque la diversidad de teorías pone de relieve que la cuestión del universo abierto o cerrado no puede resolverse todavía de manera concluyente, los resultados preliminares señalan la dirección por donde deben ir los análisis que acaben por traernos la respuesta. Además, el origen de esos tres elementos peculiares —litio, berilio y boro— proporciona gran cantidad de pistas acerca del origen y la naturaleza del universo. Desde los mensajes crípticos que está proporcionando la radiación cósmica que bombardea sin cesar la Tierra, hasta el problema aún no despejado del nacimiento del cosmos, todo indica que los tres elementos estaban probablemente presentes en cada suceso de alta energía del universo.

Sinapsis que computan el movimiento

¿Cómo procesan las neuronas la información que reciben del medio? El estudio de las células oculares que interpretan el movimiento podría identificar el mecanismo, que sin duda está implicado en otras muchas operaciones neuronales

Tomaso Poggio y Christof Koch

El cerebro es el ordenador más complejo y potente de cuantos hay sobre la tierra, y sus componentes sorprenden mucho más que los de ingenio electrónico alguno. Obra del hombre a fin de cuentas, la capacidad de cómputo de las diminutas pastillas de silicio que constituyen el soporte físico de los ordenadores (el denominado *hardware*) nos resulta familiar y comprensible. No ocurre así con las subunidades funcionales del cerebro. ¿Qué mecanismos elementales emplea ese complejo "soporte húmedo" para procesar la información? ¿Qué operaciones realiza? ¿Existen en el cráneo equivalentes biológicos de los transistores y diodos?

La neurona, o célula nerviosa, es la unidad cerebral básica de procesamiento de información. A principios de nuestro siglo los científicos descubrieron que las neuronas podían procesar información generando un impulso nervioso, al que se llamó potencial de acción. En 1943, Warren S. McCulloch y Walter H. Pitts, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), propusieron un modelo teórico de la actividad neuronal. En su opinión, las neuronas suman las señales de excitación y de inhibición enviadas por las células vecinas, generando luego un potencial de acción si la suma eléctrica supera cierto umbral; en caso contrario, permanecen mudas. Resulta fácil demostrar —y así lo hicieron McCulloch y Pitts— que los circuitos formados por esas unidades pueden efectuar todas las operaciones lógicas y que tales neuronas ideales podrían, en principio, constituir los componentes elementales del ordenador digital más complejo.

Pese a su utilidad, el modelo necesita una puesta al día. Desde hace muchos años sabemos que las neuronas encierran una complejidad mucho mayor que lo que sugirieron McCulloch y Pitts. Muestran una amplia gama de mecanismos de procesamiento de la información; las membranas de las células nerviosas generan y propagan distintos tipos de señales eléctricas y alteran sus propiedades eléctricas para adaptarse a estímulos prolongados. Muchas neuronas no generan el clásico potencial de acción. Aunque la producción y propagación de potenciales de acción desempeña, sin lugar a dudas, un papel importante en el tratamiento de la información neuronal, en las membranas celulares, y entre ellas, operan también otros mecanismos de procesamiento, cuyas funciones constituyen todavía un misterio.

Para investigar una de esas operaciones hemos emprendido el análisis de los mecanismos de que se sirve el ojo para detectar el movimiento, es decir, la dirección que sigue un estímulo que se mueve. Pretendemos esclarecer el mecanismo biofísico fundamental de detección del movimiento y definir las limitaciones de su actividad en el cerebro. Nuestra investigación se ha centrado ya en un nuevo mecanismo de procesamiento que podría estar implicado en otros muchos tipos de actividades neuronales. Esperamos que las respuestas que logremos dar a nuestras sencillas preguntas faciliten, en último término, el entendimiento de procesos más complicados, así la percepción, el pensamiento y la transformación de las entradas sensoriales en salidas motoras, que efectúan todos los sistemas nerviosos.

La estructura del cerebro refleja su complejidad funcional. Está constituido por alrededor de un billón de neuronas, muchas de las cuales reciben y envían señales a otros miles de células. En una neurona típica se distingue el cuerpo celular, que alberga la maquinaria metabólica que la sustenta, varias ramificaciones filiformes, conocidas como dendritas, y una ramificación algo más gruesa denominada axón. Por regla general las dendritas reciben las señales de entrada y el axón constituye la vía por la que las neuronas transmiten señales a otras células nerviosas. En el interior de la neurona esas señales pueden ser químicas o nerviosas; las células se comunican entre sí por medio de productos químicos especiales, segregados en la unión entre ellas: la sinapsis [*véase la figura 2*].

La retina, una capa de células que reviste la parte posterior del ojo, detecta y transmite al cerebro información del entorno visual. No es más gruesa que el filo de una hoja de afeitar y consta de un pequeño número de capas de células. Las células que estudiamos, llamadas células ganglionares, son las más alejadas de las células fotorreceptoras, que convierten la luz en señales eléctricas. Entre aquéllas y éstas se disponen capas celulares que transmiten las señales de los fotorreceptores a las células ganglionares. Los axones de las células ganglionares constituyen el nervio óptico, que une el ojo con el cerebro.

La mayoría de los organismos dotados de visión son sensibles a la dirección y el sentido del movimiento de los estímulos ópticos. Las neuronas de la retina que distinguen la dirección, denominadas neuronas selectivas de dirección, están especializadas en reconocer el movimiento en un solo sentido. El movimiento en ese sentido preferente insta una vigorosa respuesta, mientras que la célula no se inmuta ante el movimiento en sentido contrario, o "nulo".

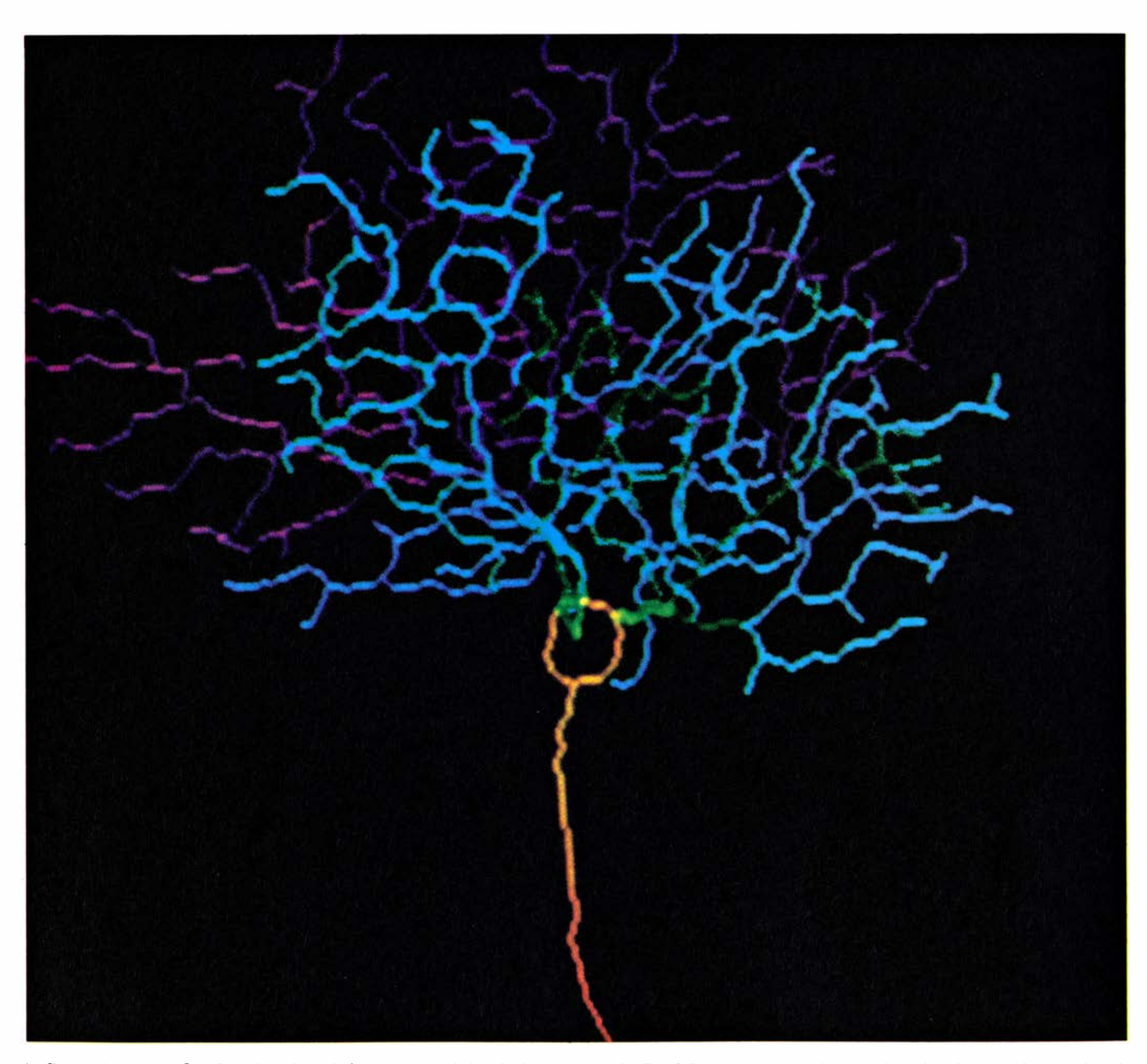
Los primeros intentos de cuantificar ese comportamiento datan de la década

de 1960, cuando Horace B. Barlow y Willian R. Levick descubrieron, en la retina del conejo, las células ganglionares selectivas de dirección. Estimulaban las células iluminando dos ranuras en una secuencia que simulaba el movimiento; medían luego las respuestas registrando la actividad eléctrica cerca del cuerpo de la célula ganglionar, aunque a extramuros del mismo. Comenzaron por iluminar cada ranura por separado y registrar la respuesta neuronal a cada iluminación; simularon luego el movimiento encendiendo y apagando la pareja de ranuras de izquierda a derecha y de derecha a izquierda, y midieron las respuestas [*véase la figura 3*].

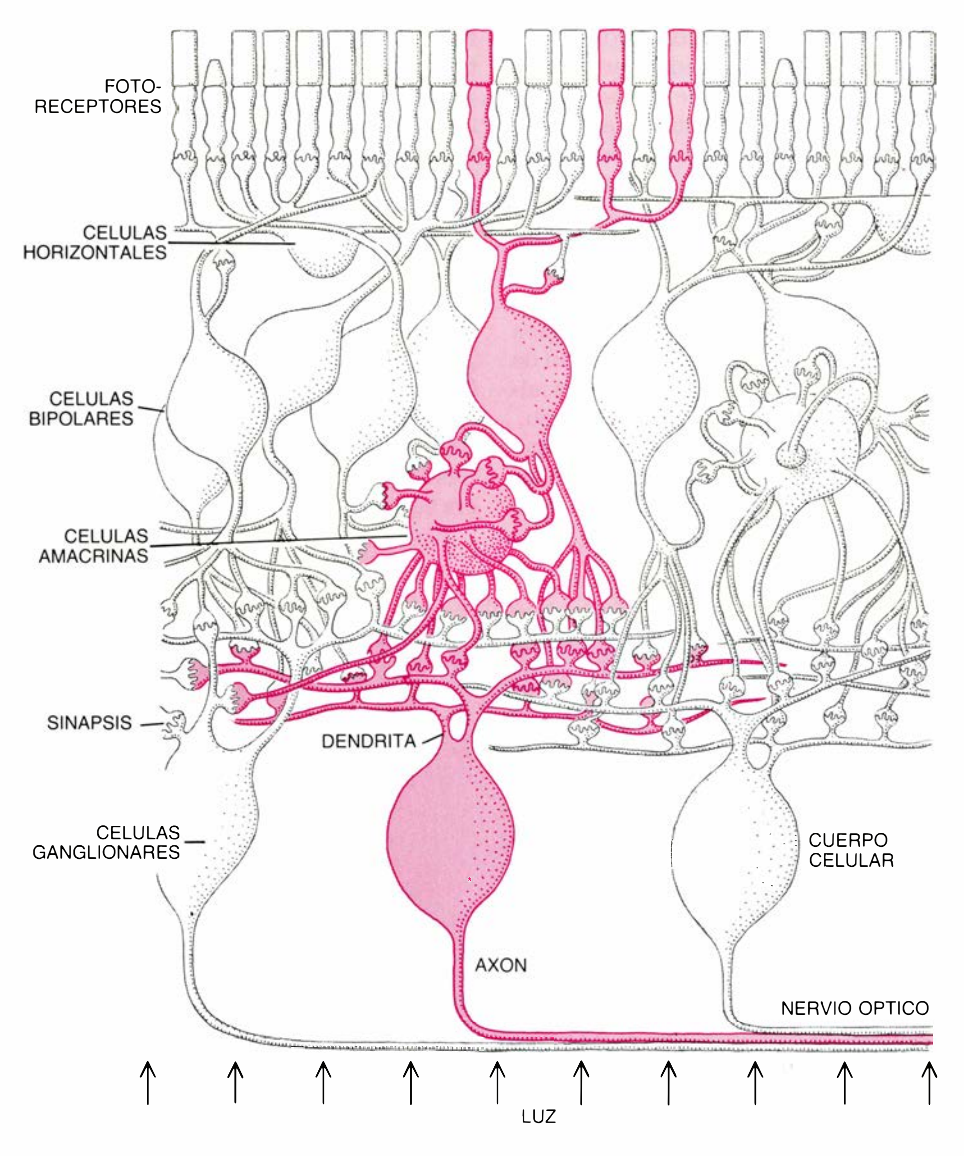
Barlow y Levick encontraron que el movimiento en el sentido preferente generaba potenciales de acción, lo que no ocurría con el movimiento en el sentido nulo. También descubrieron que el movimiento aparente en sentido nulo instaba, por parte de la célula ganglionar, una respuesta menor que la iluminación de una sola ranura. Observación sorprendente, puesto que durante la iluminación secuencial llegaba a los fotorreceptores doble cantidad de luz. La respuesta al sentido nulo resultaba mucho más débil de lo esperado.

Los investigadores concluyeron que la sensibilidad direccional de las células debía ser fruto de algún tipo de operación de amortiguación; esto es, la débil respuesta al movimiento en el sentido nulo no sólo denunciaba una carencia de sensibilidad, sino una amortiguación activa, o prohibición, de una respuesta excitadora. La neurología de entonces sabía ya que las neuronas emitían dos tipos de señales: de excitación, que favorecen el potencial de acción, y de inhibición, que lo evitan. No constituía novedad que la inhibición contrarrestara la excitación. Pero, ¿cómo se instaba una inhibición tan selectiva? Después de todo, la iluminación secuencial en cualquier sentido activaba los mismos fotorreceptores inhibidores y excitadores; la diferencia era sólo cuestión de relación temporal.

Para dar explicación a sus observa-



1. CELULA GANGLIONAR, de la retina del ojo, que puede distinguir el sentido en que se mueve un objeto dentro del campo visual. Las células ganglionares responden al movimiento en un sentido e ignoran el movimiento en sentido contrario. Frank R. Amthor y sus colegas, de la Universidad de Alabama, identificaron y tiñeron la célula, aislada de retina de conejo. Los colores distinguen diversas capas de ramas celulares. El aumento es de unos 5000 diámetros.



2. TRES CAPAS RETINIANAS procesan los estímulos visuales y mandan información sensorial al cerebro. Los fotorreceptores, que ocupan la parte posterior de la retina, transforman la energía luminosa en señales químicas y eléctricas que, atravesando las células horizontales, bipolares y amacrinas, llegan hasta las células ganglionares. Los axones de las células ganglionares forman el nervio óptico, que une el ojo con el cerebro.

ciones, Barlow y Levick elaboraron un esquema general de la reacción de la retina ante el movimiento; el modelo se fundamentaba en el que propusieron en la década de 1950 los alemanes occidentales Werner E. Reichardt y Bernhard Hassenstein para justificar el análisis del movimiento en el sistema visual de los insectos. La teoría postulada por Barlow y Levick sostiene que los fotorreceptores relacionados con las células selectivas de dirección se ordenan de tal manera que los estímulos que se mueven en el sentido preferente activan las células excitadoras antes de llegar a las inhibidoras. Por tanto, en el movimiento en dirección preferente, a los impulsos excitadores les sigue un tren de impulsos inhibidores. Ese retraso se debe, según postulan Barlow y Levick, a que las señales de inhibición avanzan más despacio que las de excitación.

De ese modo, cuando las activa el movimiento en sentido preferente, las señales de excitación dejan atrás con facilidad a las de inhibición. Veloces, atraviesan las capas de células nerviosas retinianas y se dirigen hacia el cuerpo de la célula ganglionar, de donde parten potenciales de acción. Debido a ese retraso, las señales de inhibición llegan demasiado tarde para amortiguar a las de excitación. Si, por el contrario, el movimiento es en el sentido nulo, se activan primero los receptores de inhibición; sin embargo, las señales de excitación, más veloces, dan alcance a las señales de inhibición, anulándose mutuamente al interceptarse.

El modelo de Barlow y Levick explica por qué la luz estacionaria, que activa simultáneamente los receptores de activación e inhibición, provoca más excitación que la luz que avanza en el sentido nulo, en la que las señales de inhibición salen con ventaja. Más aún, puesto que la respuesta discriminatoria de la célula ganglionar ante estímulos que se mueven en el sentido preferente o en el nulo se manifestaba por todo el campo receptor, parecía que la amortiguación debía darse en muchos puntos distintos de las neuronas retinianas. Quedaba una cuestión pendiente: ¿qué proceso biofísico podía ser responsable de esa inhabitual interacción amortiguadora?

No podrá interpretarse la generación de señales eléctricas en las neuronas sin un conocimiento de los fenómenos que la preceden. Como hemos dicho, las dendritas de una neurona, muy ramificadas, establecen, cada una, varios centenares de sinapsis, por donde reciben señales de células "presinápticas". Cuando llega a la sinapsis el potencial de acción de una célula presináptica, se libera en ella un mensajero químico, el denominado neurotransmisor, que se difunde a través del pequeño espacio que separa las células y se une a receptores especializados de la membrana de las dendritas "postsinápticas". La unión del neurotransmisor induce la apertura de canales especializados en la membrana celular. Al abrirse, los canales permiten la entrada y salida de la célula nerviosa de iones, moléculas o átomos que porten una carga eléctrica.

Esa apertura y cierre de los canales de iones de la membrana neuronal gobierna el estado eléctrico de la célula. Los iones cuya intervención en esos procesos reviste mayor importancia son los de sodio, potasio y cloro. Las bombas de la membrana celular aumentan las concentraciones de ciertos iones y rebajan las de otros; por ejemplo, hay más potasio en el interior de la célula que fuera, y más sodio y cloruro en el líquido que rodea la célula que dentro. Las diferencias de concentración constituyen el denominado gradiente de concentración del ion considerado.

Consecuencia de esa distribución iónica, a la que se suma la contribución de otras moléculas celulares cargadas, el interior de una neurona es alrededor de 60 o 90 milivolt más negativo que el exterior. (Un milivolt es una milésima de volt; recuérdese que con una pila de 1,5 volt se dispara la luz de un flash.) Ese potencial se denomina de reposo, porque es el que presenta la célula

cuando no está transmitiendo impulsos. La diferencia de potencial entre el interior y exterior celular crea lo que se conoce por gradiente de potencial.

Cuando la estimulación sináptica abre los canales de iones cercanos a la sinapsis, de la célula entran y salen iones, perturbándose el potencial de reposo en esa zona. Si el potencial se hace más positivo, se dice que la célula se despolariza; se hiperpolariza cuando gana cargas negativas. Ese potencial recién generado viaja hasta el cuerpo celular, disminuyendo conforme se propaga, como ocurre en la propagación de una señal eléctrica por un cable submarino. Si la despolarización que alcanza el cuerpo celular es suficientemente pronunciada, inducirá un potencial de acción. Por tanto, la estimulación despolarizante lo es de excitación, y el cambio de potencial se denomina potencial postsináptico de excitación (PPSE). La estimulación de inhibición, que en la mayoría de los casos es hiperpolarizante, genera un potencial postsináptico de inhibición (PPSI).

Unas sinapsis transmiten señales de excitación y otras de inhibición, según el canal iónico que regulen. Cuando los canales de iones están abiertos, la dirección en que se mueve cada ion depende de las fuerzas ejercidas por la concentración y los gradientes de potencial. El sodio, un ion de carga positiva, se difundirá hacia el interior de la célula a través de cualquier canal de sodio que se encuentre abierto, pues tanto su gradiente de concentración como su gradiente de potencial favorecen el movimiento en ese sentido. La entrada de iones positivos de sodio provoca la despolarización de la neurona, de ahí que las sinapsis que controlan los canales de sodio sean de excitación.

Por su parte, el potasio, que también porta carga positiva, abandona la célula por los canales de potasio que encuentre abiertos. El gradiente de concentración facilita la salida de potasio; en efecto, es tan pronunciado que supera la fuerza del gradiente de potencial, que pugna por introducir cargas positivas en el interior de la célula. La salida de iones positivos de potasio hiperpolariza la célula, por lo que las sinapsis que controlan canales de potasio son de inhibición.

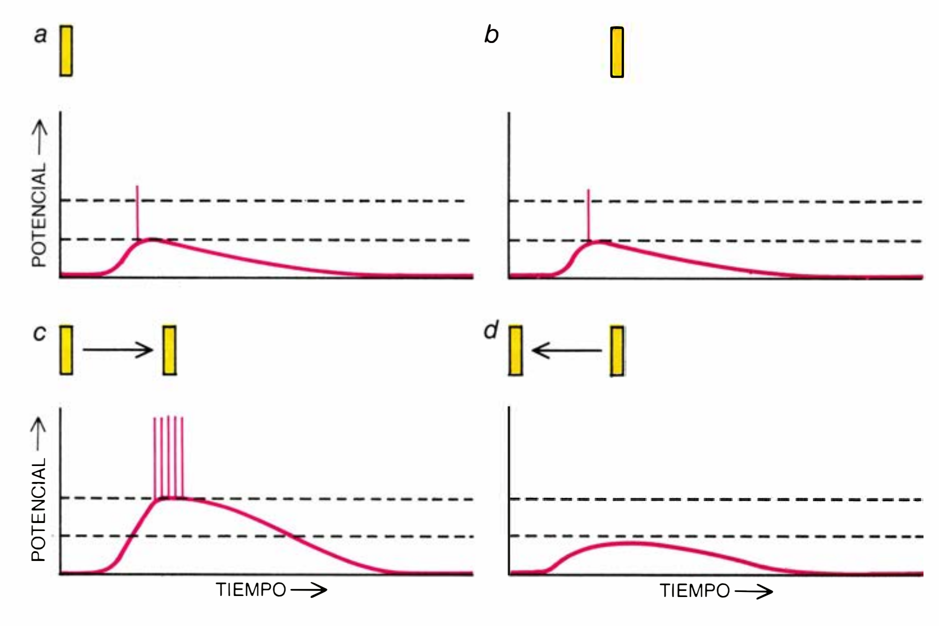
Una misma neurona puede experimentar simultáneamente varias señales de excitación e inhibición. Sus PPSE y PPSI se propagan hacia el cuerpo celular y pueden medirse a modo de contribuciones positivas y negativas al potencial celular. Hasta aquí esa visión de la actividad neuronal no se desvía de la neurona teórica de McCulloch y Pitts, y muchas funciones neuronales parecen reflejar ese modo de operar.

Sin embargo, a finales de la década de 1970, diversos tipos de pruebas ponen de manifiesto que la mera interacción entre excitaciones e inhibiciones no podía explicar el proceso de amortiguación observada en la detección del movimiento. Por ejemplo, en experimentos que medían la actividad eléctrica dentro de las células ganglionares, y no fuera, se pusieron de manifiesto el funcionamiento interno y las interacciones de los PPSE y PPSI que controlan la generación de potenciales de acción. Demostraron que, cuando a la inhibición habitual se suma la excitación, el efecto neto suele consistir en una hiperpolarización [*véase la figura 4*]. Sin embargo, los registros intracelulares efectuados en retina de tortuga por Piero L. Marchiafava, del Consejo nacional italiano de Investigaciones en Pisa, demostraron que la interacción entre la excitación y la inhibición que se da en la detección del movimiento siempre origina despolarizaciones suaves y nunca hiperpolarizaciones. En efecto, nunca se ha detectado hiperpolarización.

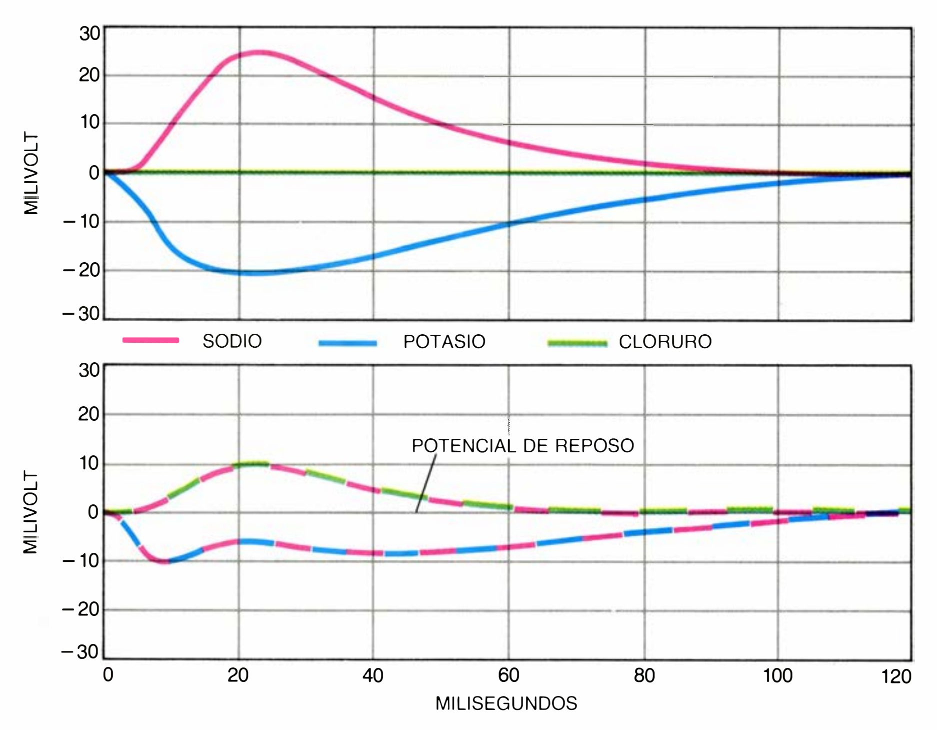
En 1978, Vincent Torre, de la Universidad de Génova, y uno de los autores (Poggio, a la sazón en el Instituto Max Planck de Biocibernética, de Tübingen) sugirieron la posibilidad de que el responsable del efecto de amortiguación observada en la detección del movimiento fuera un tercer tipo de mecanismo sináptico, en el que participaría otro tipo de inhibición, la denominada inhibición silenciosa, conocida desde la década de 1950; se la llama también inhibición en paralelo. Nos valdremos de iones cloruro para ilustrar el principio básico, si bien algunos experimentos inducen a pensar que el cloruro podría no ser el único ion implicado.

Al igual que ocurre con el sodio, hay mayor concentración de cloruro en el exterior que en el interior celular; a diferencia del sodio, el cloruro porta carga negativa, y el gradiente de potencial se opone a la entrada de los iones negativos hacia el interior de las células en reposo. El gradiente de concentración y el gradiente de potencial se contrarrestan mutuamente, de manera que, cuando una sinapsis de inhibición silenciosa da la señal para que se abran los canales del cloruro, no ocurre nada. Apenas si se registra redistribución neta del cloruro ni alteración del potencial de reposo.

Por el contrario, si se activan a la vez una sinapsis de inhibición silenciosa y otra de excitación, la repentina afluen-



3. ACTIVIDAD ELECTRICA de las células ganglionares. Aportó las primeras pistas sobre el mecanismo en el que se basa la detección del movimiento. En la década de 1960, Horace B. Barlow y William R. Levick, de la Universidad de California en Berkeley, estimularon retinas de conejo a través de dos ranuras que podían iluminarse individualmente (*arriba*) o bien, para simular movimiento, secuencialmente (*abajo*). Iluminando cada ranura por separado se generaba un potencial de acción, un impulso eléctrico que se propagaba a otras células nerviosas (*a*, *b*). El movimiento aparente en un sentido (el "preferente") generaba muchos potenciales de acción (*c*), mientras que el movimiento en sentido opuesto (el "nulo") solía proporcionar una respuesta mucho menos intensa (*d*). A partir de esos resultados, Barlow y Levick concluyeron que algún tipo de "amortiguación" biofísica bloqueaba selectivamente la excitación instada por el movimiento en sentido nulo.



4. POTENCIALES NERVIOSOS provocados por los cambios de las concentraciones iónicas que se registran en el interior celular. La afluencia de iones positivos de sodio, resultante de la apertura de los canales de sodio de la membrana de la célula nerviosa por parte de un estímulo excitador, desencadena un potencial postsináptico de excitación, o PPSE (*línea roja*). Cuando un estímulo inhibidor abre los canales de potasio, salen de la célula iones de ese elemento, que portan carga positiva, generándose un potencial postsináptico de inhibición, o PPSI (*azul*). No se registra movimiento neto de iones cuando sólo están abiertas las puertas del cloruro (*verde*), mientras que, si se abren simultáneamente los canales de sodio y de cloro, penetran en la célula nerviosa los iones cloruro y disminuye el PPSE; ese efecto recibe el nombre de inhibición silenciosa (*línea roja y verde*). Obsérvese que, si interactúa con la excitación, la inhibición común puede hacer más negativa a la célula (*línea roja y azul*), mientras que la inhibición silenciosa ejerce una influencia positiva.

cia de sodio despolariza la célula y subvierte el equilibrio entre los dos gradientes: se reduce el efecto repulsor del gradiente de potencial, se supera el gradiente de concentración y se introducen iones cloruro. El efecto neto de la interacción provoca una despolarización suave, como las observadas por Marchiafava en la retina de tortuga.

A menos que la señal de inhibición coincida con la de excitación, no puede detectarse controlando el potencial nervioso; de ahí el nombre de inhibición "silenciosa". La activación de esa inhibición depende de una señal excitadora y, tal como predice el modelo de Barlow y Levick, las señales de excitación e inhibición sólo coinciden cuando las estimula el movimiento en sentido nulo. En el movimiento en sentido preferencial, el retraso de la inhibición evita la amortiguación de la excitación y la célula responde vigorosamente. Por tanto, la inhibición silenciosa que postulamos representa una plasmación viable de los modelos abstractos propuestos por Reichardt y Hassenstein y por Barlow y Levick.

La aplicación del mecanismo de la inhibición silenciosa a la selectividad direccional también resulta atractiva por otra razón. De nuestro modelo se infiere que el mejor emplazamiento de una sinapsis de inhibición silenciosa es allí donde coincida con una sinapsis de excitación o bien en algún punto situado entre la sinapsis de excitación y el cuerpo de la célula ganglionar. Por consiguiente, para operar, el modelo requiere sólo unas cuantas sinapsis y una región de membrana dendrítica. Las dos señales interactúan antes de llegar al cuerpo celular, satisfaciéndose así la observación según la cual la amortiguación vendría a producirse en muchos puntos distintos de las neuronas retinianas.

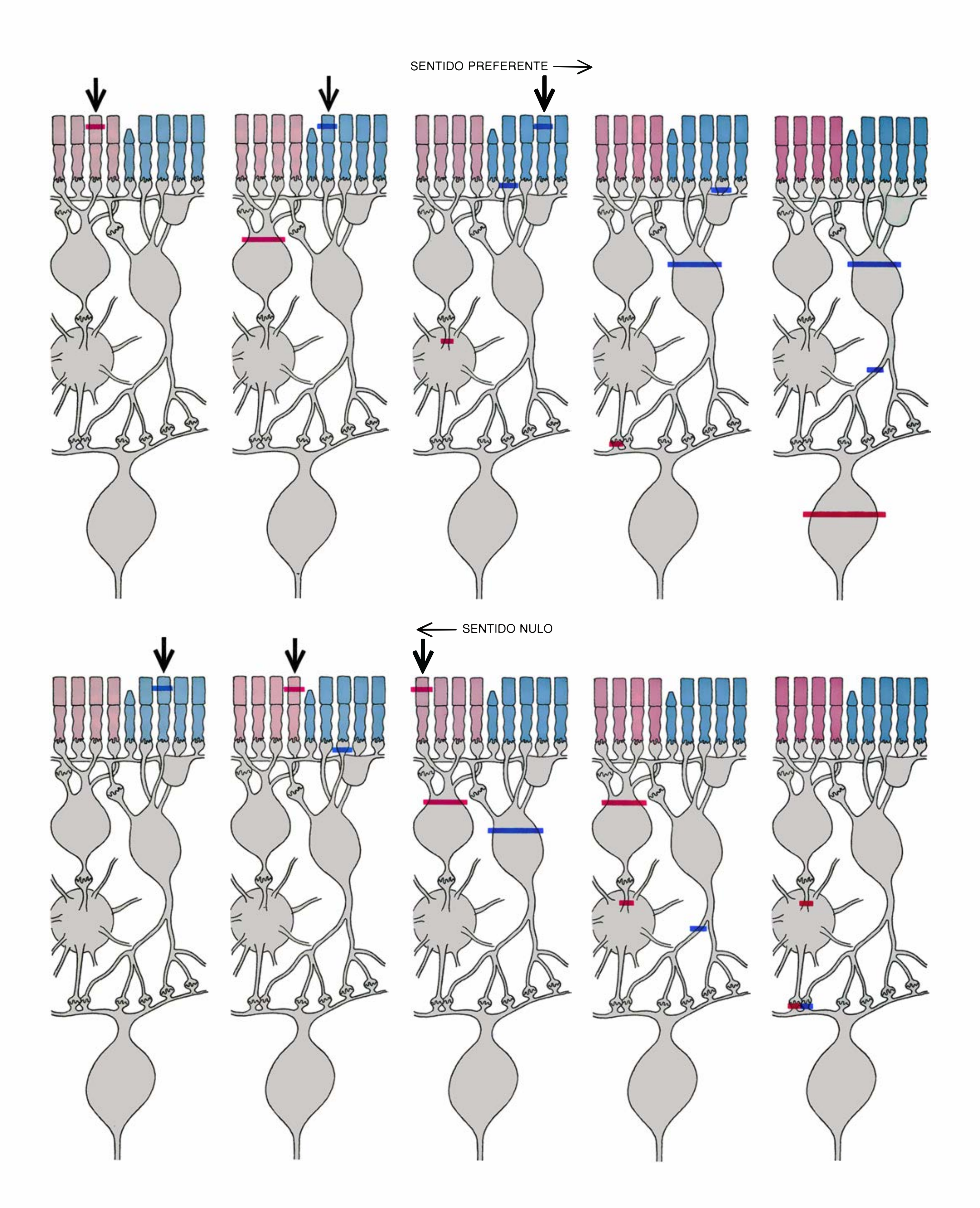
Pero no estábamos todavía convencidos de que las características fisiológicas exigidas por nuestro modelo resultaran verosímiles. ¿Qué proximidad necesitaban las sinapsis de excitación e inhibición para influir sobre sus respectivos potenciales? ¿Dónde se hallaban los lugares óptimos de las sinapsis y cuál era la configuración óptima de las dendritas? En busca de una respuesta acudimos al ordenador.

Los razonamientos teóricos utilizados para describir la propagación del potencial eléctrico en una célula nerviosa derivan de los que desarrolló Lord Kelvin en el siglo XIX para analizar el flujo de corriente en los cables transatlánticos empleados en la transmisión telefónica. Wilfrid Rall, del Instituto Nacional estadounidense de la Artritis, Diabetes y Enfermedades Digestivas y Renales, aplicó el análisis de Kelvin a la propagación del potencial en las dendritas arborescentes. Pero el verdadero cálculo empezó en el Instituto Max Planck; más tarde, nos servimos de un programa de simulación de circuitos, denominado SPICE, desarrollado hace más de 10 años en la Universidad de California en Berkeley.

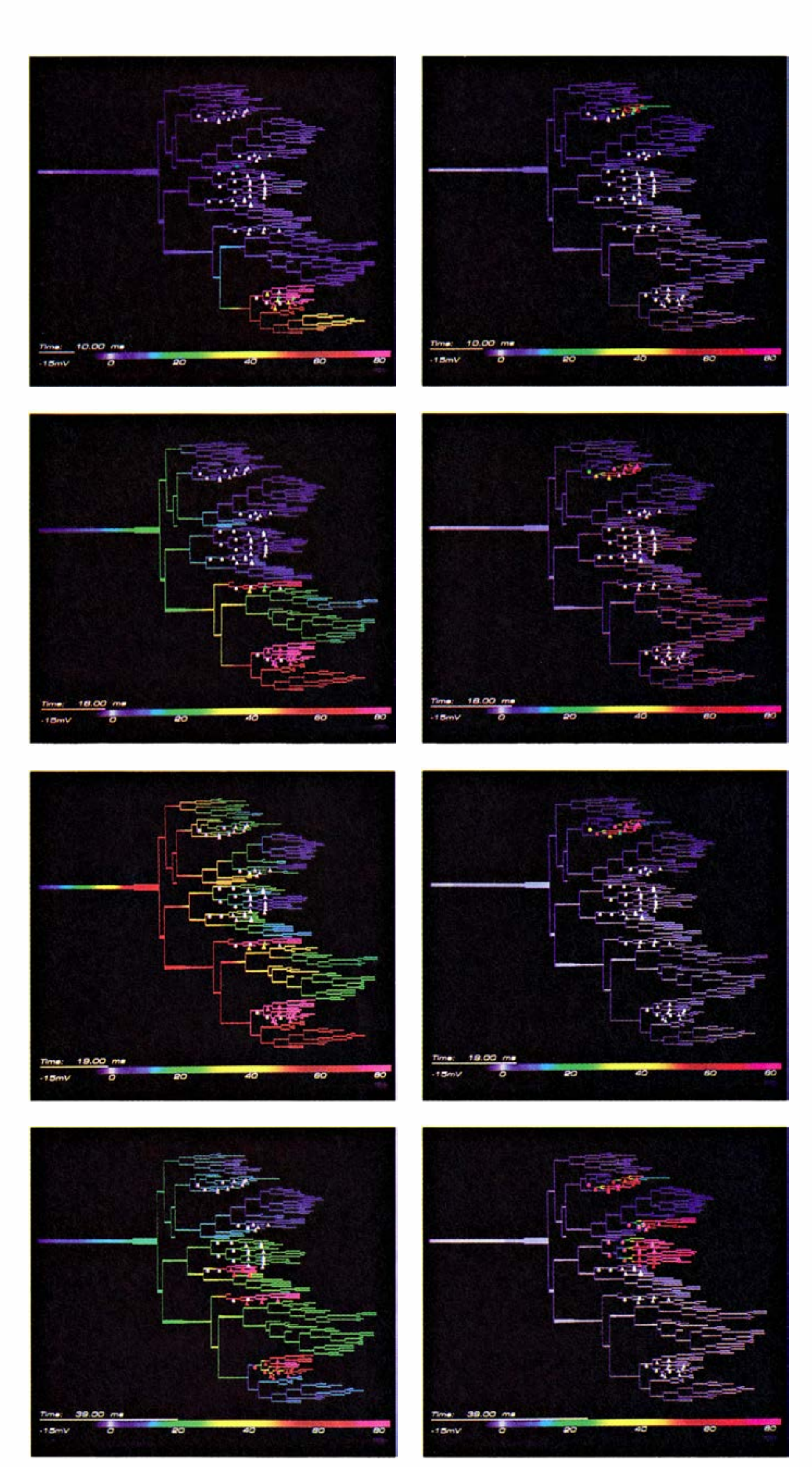
Ayudados por Patrick A. O'Donnell, del Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, abordamos, hace unos tres años, el desarrollo de nuestra propia versión. A partir de descripciones anatómicas de la forma de la neurona, de la longitud y diámetro de sus ramas y de otros datos, nuestra versión del SPICE propone el pertinente modelo "de alambre" y asigna propiedades eléctricas al árbol de dendritas generado por ordenador. Puede representar en colores el curso del potencial nervioso desencadenado en respuesta a la entrada sináptica que se le haya dictado.

Tales simulaciones han demostrado la verosimilitud del mecanismo que proponemos: genera modelos de actividad eléctrica que explican la selectividad en función del sentido del estímulo. Las simulaciones han confirmado igualmente nuestra sospecha de que la inhibición silenciosa debe constituir un fenómeno muy localizado, cuya eficacia depende de las posiciones relativas de la excitación y la inhibición en el árbol dendrítico. Para bloquear la propagación de una PPSE, la inhibición silenciosa tiene que aparecer en el camino directo que separa la sinapsis de excitación del cuerpo celular. En las simulaciones se supone que la membrana dendrítica no amplifica la señal de excitación, pero aunque lo hiciera seguirían siendo válidas tales limitaciones. Por tanto, la simulación nos ha permitido demostrar que el efecto de amortiguación transcurre en muchos puntos del árbol dendrítico y antes de que las señales lleguen al cuerpo celular.

En los últimos años se ha recabado también información a partir de registros de la actividad eléctrica del interior de las células selectivas de la dirección. ¿Cómo acomoda nuestro modelo teórico los nuevos datos experimentales? Los registros obtenidos en células ganglionares de retina de tortuga y de sapo



5. CARRERA DE POTENCIALES NERVIOSOS, cuyo resultado a la llegada a la célula ganglionar difiere según el movimiento se dé en el sentido preferente (*arriba*) o nulo (*abajo*). En este modelo esquemático los fotorreceptores de cada célula ganglionar se encuentran ordenados de tal manera que el estímulo (*flecha gruesa*) que se mueve en el sentido preferente estimula los receptores de excitación (*rojo*) antes que los receptores de inhibición (*azul*). El modelo también supone que las señales de inhibición (*barras azules*) están retrasadas, en el tiempo, respecto de las señales de excitación (*barras rojas*). Cuando el movimiento es en el sentido preferente, los impulsos de inhibición nunca alcanzan a los de excitación, que generan potenciales de acción en el cuerpo de la célula ganglionar. Pero cuando el movimiento es en sentido nulo, la señal de inhibición llega a la célula ganglionar a la vez que la señal de excitación y evita la generación de un potencial de acción. Los autores sugieren que en el mecanismo por el que ambas señales se anulan debe participar la inhibición silenciosa.



6. SIMULACIONES POR ORDENADOR que reproducen la morfología y las propiedades eléctricas de la célula ganglionar de la figura 1. Los colores "calientes", como el rojo, naranja y amarillo, indican excitación; los fríos denotan inhibición. Se representa a la vez la actividad de las sinapsis de excitación (*triángulos*) y de inhibición (*círculos*). En la secuencia izquierda el estímulo se mueve, en cada fotograma, de abajo arriba; las respuestas de inhibición están retrasadas 20 milisegundos respecto del modelo del movimiento en sentido preferente. En la secuencia de la derecha, que simula una estimulación en el sentido nulo, no hay retraso de las señales de inhibición. En la secuencia de la izquierda las señales de excitación alcanzan el cuerpo celular y, a los 19 milisegundos, generan un potencial. El modelo, programado por Patrick A. O'Donnell, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostró que, para lograr la amortiguación de la inhibición silenciosa, las sinapsis de excitación e inhibición deben estar suficientemente juntas. (Figura de James Kilkelly.)

apoyan el esquema de las interacciones sinápticas representadas en nuestro modelo. Más aún, los registros intracelulares más recientes de Marchiafava han revelado el funcionamiento de la inhibición silenciosa, normalmente invisible si se activan sólo las sinapsis de inhibición. Marchiafava consiguió hacer más positivo el potencial celular de reposo generando en las células una corriente positiva por medio de un electrodo registrador; subsiguientemente, la acción aislada de las señales de inhibición silenciosas aparecía como una hiperpolarización del potencial de reposo, elevado.

Otras investigaciones han desentrañado la anatomía de las células selectivas de la dirección. Inyectando colorantes fluorescentes en ellas, Frank R. Amthor, Clyde W. Oyster y Ellen S. Takahashi, de la Universidad de Alabama, obtuvieron una imagen de excepcional claridad de las células retinianas de conejo, que Barlow y Levick habían explorado 20 años antes. Ralph J. Jensen y Robert DeVoe, a la sazón en la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, aplicaron con éxito comparable ese mismo procedimiento a células ganglionares de tortuga. Poseen éstas unas dendritas muy ramificadas, con extensiones de extremada finura, que maximizan el número de sitios donde pueden operar las interacciones sinápticas. Esa configuración se ajusta a nuestra hipótesis de que la inhibición silenciosa constituye un fenómeno que goza de localización propia.

Queda por comprobar una predicción: la localización relativa de las sinapsis de excitación e inhibición en el árbol dendrítico de las células selectivas de la dirección. El reciente descubrimiento de los neurotransmisores que median los PPSE y PPSI ayudará a esas investigaciones. El aminoácido ácido gamma-amino butírico (GABA), neurotransmisor común que inhibe el sistema nervioso central, desempeña también un papel inhibidor de la selectividad de la dirección: las células ganglionares selectivas de la dirección, tratadas con drogas que bloquean la acción del GABA, responden de igual manera al movimiento en los sentidos nulo o preferente. En experimentos de diseño similar, Richard H. Masland, del Hospital General de Massachusetts, y Michael Ariel y Alan R. Adolph, del Instituto de Investigación Oftalmológica de Boston, han demostrado que la acetilcolina (ACh) actúa

como neurotransmisor de excitación en la discriminación del movimiento por parte de las retinas de tortuga y de conejo.

Puesto que tanto la ACh como el GABA son susceptibles de marcaje, quizá pueda ya identificarse las sinapsis de excitación y de inhibición de células ganglionares selectivas de la dirección teñidas. En ello está trabajando el laboratorio de John E. Dowling, de la Universidad de Harvard. El resultado de ese experimento pudiera ser decisivo para confirmar o desechar nuestro modelo.

Aunque éste explique las pruebas empíricas recabadas hasta la fecha, no se han descartado otras hipótesis sobre la selectividad de la dirección. Por ejemplo, resulta verosímil que la excitación y la inhibición silenciosa interactúen, antes de alcanzar la célula ganglionar, en las dendritas de otra neurona retiniana. Podría darse esa interacción en la célula estrellada amacrina descrita por Masland [véase "Arquitectura funcional de la retina", por Richard H. Masland; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1987]. Las células amacrinas se encuentran en la capa intermedia de la retina, que transporta las señales desde los fotorreceptores hasta las células ganglionares.

Son, esas células, las únicas de la retina que sintetizan y secretan ACh y, por consiguiente, las que probablemente proporcionen las señales de excitación a las células ganglionares selectivas de la dirección. Sin embargo, la liberación celular del transmisor podría constituir ya un reflejo de la influencia de la inhibición. Más aún, DeVoe y sus colaboradores han encontrado los primeros indicios de propiedades selectivas de la dirección en amacrinas de tortuga y células bipolares, que residen, ambas, en la capa de células situada entre los fotorreceptores y las células ganglionares. Su descubrimiento suscita la posibilidad de que el movimiento se compute en localizaciones retinianas distintas de las células ganglionares, o además de en éstas.

Gracias al avance conjunto de la teoría, diseño de modelos y datos experimentales estamos muy cerca de desentrañar el mecanismo en el que se basa la detección del movimiento en la retina animal. ¿Por qué resulta tan interesante ese proceso? Dada la importante función que desempeña en el primer estadio de la visión, la sensibilidad a la dirección constituye, por sí misma, un tema digno de análisis. Mucha más importancia revestiría la interpretación de un mecanismo elemental del procesamiento de la información que pudiera estar implicado en otras tareas de cómputo. Diversos investigadores han propuesto, tras haberlo estudiado en animales distintos, la intervención de un mismo mecanismo en el cálculo de la profundidad binocular, de las discontinuidades del movimiento visual y del movimiento táctil por la superficie del cuerpo.

No carece de atractivo que el modelo de la amortiguación sináptica constituya un elemento de cómputo, por su acción localizada y su flexibilidad, sobre todo si lo comparamos con la generación de potenciales de acción. Por operar a tan pequeña escala, el mecanismo puede repetirse centenares de veces en las ramas dendríticas, estableciendo subunidades más o menos independientes en una misma neurona. Si en el modelo de McCulloch y Pitts la neurona viene a equivaler a un transistor, en el nuestro evocaría la pastilla de ordenador, dotada de centenares de transistores.

La biofísica de la computación, así hemos bautizado a nuestra disciplina, se ocupa del análisis de la participación que corresponde a los diversos mecanismos biofísicos que subyacen al procesamiento de la información por parte del sistema nervioso. Por supuesto, la biofísica de la computación no se limita al estudio de la generación del potencial de acción y de las interacciones entre entradas sinápticas. Existen muchos fenómenos biofísicos capaces de procesar, propagar y almacenar información. Hemos examinado varios mecanismos de ese tipo, aplicando, al efecto, procedimientos como el filtrado de las señales de cierta frecuencia, la modificación de la fuerza de las conexiones entre neuronas y el control, con productos químicos de actuación lenta, de la señal de salida de las células nerviosas.

Tanto los experimentadores como los teóricos están empeñados en identificar esos fenómenos y caracterizar los papeles que les corresponden en el procesamiento de la información. Quizás algún día se deduzcan, a partir de la morfología celular de un circuito neuronal dado, las operaciones que puede realizar y, en última instancia, explorando los intrincados secretos del sistema nervioso central, se relacione el complejo procesamiento propio del cerebro humano con los conocimientos que han posibilitado la construcción de ordenadores.

Ciencia y sociedad

Neutrinos de supernova

La supernova 1987A, la explosión estelar más luminosa observada en tiempos modernos, ha suscitado el debate sobre un tema fundamental en física: ¿cuál es la masa, en la hipótesis de que tenga, de la partícula más abundante del universo, el neutrino? Desde hace tiempo los cosmólogos vienen postulando que si la masa de los neutrinos es suficientemente grande quizá logren detener e incluso invertir la actual expansión del universo. Tan esquivos son los neutrinos que atraviesan sin impedimento alguno planetas y estrellas, pero esa misma cualidad ha dificultado la determinación de su masa.

En realidad existen tres tipos de neutrinos —electrónico, muónico y tauónico— y, según defiende la teoría, las supernovas los generan en dos fogonazos distintos. El primero tiene lugar cuando, al colapsarse el núcleo estelar, sus electrones y protones se funden y forman neutrones y neutrinos electrónicos. Cuando escapan los neutrinos electrónicos, el núcleo se colapsa más aún y emite un pulso de los tres tipos de neutrinos y de sus correpondientes partículas de antimateria.

Según cree la mayoría de los investigadores, las señales captadas por dos observatorios de partículas unas tres horas antes de la aparición de la supernova corresponden al segundo pulso emitido por 1987A, el más potente. En el observatorio IMB, enterrado en una mina de sal próxima a Cleveland y que gestionan la Universidad de California en Irvine, la de Michigan y el Laboratorio Nacional estadounidense Brookhaven, en seis segundos se captaron ocho "fenómenos". En el observatorio Kamiokande II, instalado en una mina cercana a Kamioka, Japón, y que utilizan la Universidad de Tokyo, el Laboratorio Nacional japonés de Física de Altas Energías, la Universidad de Niigata y la de Pennsylvania, se registraron 11 fenómenos en 13 segundos.

*1. ANTINEUTRINO de la supernova 1987A que, en esta simulación por ordenador, genera destellos de luz (***símbolos amarillos***) en el observatorio de partículas IMB. El IMB está formado por un tanque de agua rodeado de tubos fotomultiplicadores. El número de barras que forman los símbolos es proporcional a la intensidad de la señal. Sus colores reflejan los tiempos de llegada, que se leen en la escala de la izquierda, dividida en intervalos de nanosegundos.*

Según parece, todos los registros los provocaron antineutrinos electrónicos —los gemelos, en antimateria, de los neutrinos electrónicos— de diversas energías. Al poseer, así se cree, los gemelos masas iguales, un cálculo relativamente sencillo permitiría establecer un límite superior de la masa de los neutrinos electrónicos en reposo. A tal efecto debía analizarse en qué medida los antineutrinos electrónicos de energías superiores precedían a los de menor energía. Si las partículas poseían una sola masa en reposo, las dotadas de mayor energía viajarían más deprisa que las de energía inferior; cuanto mayor fuera la masa en reposo, mayor sería la diferencia entre los tiempos de llegada de los neutrinos de alta energía y los de baja energía.

La primera estimación publicada ha sido la de John N. Bahcall, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, New Jersey, y Sheldon Lee Glashow, de la Universidad de Harvard. Afirman, en *Nature*, que la masa del neutrino electrónico debe ser inferior a los 11 eV (electronvolt). Bahcall y Glashow sostienen que su resultado "confirma la interpretación de que los neutrinos electrónicos no constituyen el componente principal de la densidad de masa del Universo". Recientemente, y tras cuidadosas mediciones de neutrinos electrónicos obtenidos en el laboratorio por desintegración radiactiva, varios grupos otorgan al límite superior de su masa un valor de alrededor de 20 eV, que no es suficientemente bajo para descartar la posibilidad de que provoquen la contracción del universo.

Alfred K. Mann, de la Universidad de Pennsylvania y del observatorio Kamiokande II, señala que, en el análisis de los mismos datos que estudiaron Bahcall y Glashow, otros investigadores han llegado a estimaciones comprendidas entre menos de 4 eV y más de 20 eV. Tales divergencias, afirma, son reflejo de la incertidumbre sobre la que se apoyan esos cálculos. "La cuestión principal, explica Mann, es que conocemos el momento de llegada de los neutrinos, pero no el de su salida." El tratamiento más "riguroso" de esa incertidumbre, apostilla, arroja un límite superior de alrededor de 20 eV.

John C. van der Velde, de la Universidad de Michigan y del proyecto IMB, sugiere que, si los detectores de neutrinos recolectaran más datos de otras supernovas, "quizá lográramos desenredar la madeja". Sin embargo, Van der Velde señala que, aun cuando la masa del neutrino eletrónico no bastara para "cerrar" el universo, persisi-

tiría la duda de si lo lograrían las masas de los neutrinos muónico y tauónico.

Caldeamiento central

Comprimiendo minúsculas muestras de hierro entre dos diamantes y lanzando proyectiles de alta velocidad contra finas láminas de aquel metal, se ha obtenido una estimación de las temperaturas que prevalecen en el núcleo terrestre que supera a todas las anteriores. En *Science*, investigadores de la Universidad de California en Berkeley y del Instituto de Tecnología de California (Caltech) exponen cómo dedujeron esas temperaturas a partir de la medición del punto de fusión del hierro —el constituyente principal del núcleo— sometido a presiones inmensas.

Su razonamiento se apoya en diversas propiedades, sobradamente comprobadas, del núcleo terrestre. Los estudios sísmicos han demostrado que el núcleo externo, que limita con el manto envolvente a unos 2900 kilómetros de profundidad, se encuentra fundido. Por consiguiente, el punto de fusión del hierro sometido a las presiones que, según se ha calculado, reinan en la cima del núcleo externo establece una cota inferior para la temperatura reinante allí. El núcleo interno, que se extiende desde los 5200 kilómetros de profundidad hasta el centro de la Tierra, a 6370 kilómetros, es sólido. La temperatura de la interfase que separa los núcleos externo e interno debe ser la del punto de fusión (que aumenta notablemente en función de la presión y, por consiguiente, de la profundidad).

Las mediciones directas del punto de fusión a altas presiones efectuadas anteriormente se habían limitado a los 20.000 millones de pascal, es decir, unas 200.000 veces la presión atmosférica, equivalentes a las condiciones que deben reinar a no más de 600 kilómetros de profundidad. Explotando la asociación de varias técnicas, los científicos, dirigidos por Raymond Jeanloz, de Berkeley, y Thomas J. Ahrens, del Caltech, han ampliado las mediciones hasta los 250.000 millones de pascal, simulando así las condiciones propias de regiones muy adentradas en el núcleo.

Para alcanzar presiones de hasta 100.000 millones de pascal, los investigadores de Berkeley comprimieron el hierro en un celdilla de yunques de diamante, dispositivo en el cual, por medio de un sencillo montaje de tornillos y pistones, se ejerce presión sobre una muestra atrapada entre las caras de dos diamantes. Al ser transparentes los diamantes, pudo caldearse el hierro por medio de un láser de luz infrarroja, determinándose la temperatura de fusión de la muestra a varias presiones a partir del espectro de la luz emitida. El grupo del Caltech logró presiones incluso superiores utilizando hidrógeno comprimido, con el que impulsaban un proyectil contra una película, u hoja, de hierro montada sobrte una ventana de cristal. El impacto comprimía y caldeaba a la vez la muestra, cuya temperatura se establecía a partir de la radiación térmica detectada a través de la ventana.

La relación entre la temperatura de fusión y la presión así inferida demostraba que la temperatura de la cima del núcleo externo, cuya presión es de 136.000 millones de pascal, debe ser cuando menos de 3800 grados Kelvin. (La temperatura de fusión del hierro puro a esa presión es, en realidad, 1000 grados superior, pero los autores rebajaron las estimaciones para tomar en consideración el efecto de las impurezas que supuestamente están mezcladas con el hierro del núcleo.) Por extrapolación de los resultados se dedujo que la cumbre del núcleo interno, donde la presión es de 330.000 millones de pascal, se encuentra a una temperatura de alrededor de 6600 grados. Los investigadores cifran en 6900 grados Kelvin —más que la superficie del Sol— el límite superior de la temperatura del centro de la Tierra.

Esos valores se sitúan entre 2000 y 3000 grados por encima de las estimaciones anteriores, basadas en pruebas menos directas. Puesto que son las diferencias térmicas lo que impulsa los movimientos convectivos del interior de la Tierra —procesos que se manifiestan en la dertiva continental y las erupciones volcánicas—, las consecuencias geofísicas de que el núcleo se halle a una temperatura extremadamente elevada pueden ser notables. Según Ahrens, los resultados implican que "una fracción muy elevada del calor del manto terrestre se genera en el núcleo", y éste podría desempeñar un papel mayor del que se le atribuía en los movimientos del manto y de la corteza."

Contrasentido

El dogma del ADN sostiene que sólo una de las hebras de un segmento de doble cadena de ADN determina productos genéticos. A ese filamento le encuentra sentido la maquinaria celular de interpretación y se transcribe en ARN, la molécula de paso; la otra secuencia, "sin sentido", se limitaría a conservar la integridad de la secuencia codificadora. A lo largo del pasado año un puñado de experimentos ha puesto en cuestión tal modelo y un equipo de científicos de la Universidad de Ciencias de la Salud de Oregon ha obtenido ahora pruebas concluyentes de que dos genes distintos pueden ocupar un mismo segmento de ADN, ubicados, uno frente a otro, en hebras contrarias.

Los investigadores, encabezados por John P. Adelman, del Instituto de Investigaciones Biomédicas Avanzadas, buscaban, en tejido cerebral de rata, copias del gen que determina la hormona liberadora de gonadotropina (GnRH). Tal como exponen en *Nature*, utilizaron sondas obtenidas de filamentos transcritos a partir de ADN de GnRH; las sondas tenían por misión reconocer el filamento del gen de GnRH dotado de sentido.

Las sondas se adhirieron a ambos filamentos, en lo que parecía constituir una señal de que la secuencia génica opuesta a GnRH también se transcribía. Adelman y sus colegas examinaron seguidamente una amplia gama de tejidos de rata, en busca de pruebas que confirmaran esa transcripción de la hebra supuestamente carente de sentido. Las encontraron, y especialmente en el corazón, por lo que al gen de la hebra sin sentido lo denominaron SH (por "*sweetheart*", "cariño").

Se había descrito ya en bacterias la transcripción del filamento sin sentido, pero hasta el año pasado se ignoraba que también se diera en formas de vida superiores. En experimentos efectuados con células de insecto y de mamífero obtenidas en cultivo se demostró la posibilidad de que se produjera solapamiento entre genes situados en hebras opuestas. Sin embargo, esos informes se juzgaron casos excepcionales de muestras celulares poco comunes. Por el contrario, la investigación de Adelman se había efectuado con tejido ordinario de ratas de laboratorio y los genes de GnRH y SH no se solapaban de modo parcial, sino que coincidían.

En opinión de Adelman, se ignora la abundancia de esos genes coincidentes, si bien sospecha que otros "artefactos" experimentales podrían ser genes que habían pasado inadvertidos. Quizá deban repetirse muchos ensayos cartográficos de ubicación de los genes a lo largo de los cromosomas para corroborar que no se haya pasado por alto algún compañero genético.

El nuevo giro que adopta así la historia del conocimiento de la doble hélice quizás influya también sobre el de las estrategias evolutivas. La GnRH es una hormona necesaria en el desarrollo

sexual. Por consiguiente, su gen presenta gran estabilidad, pues cualquier mutación o deleción esterilizaría al individuo que la portara e impediría su transmisión a las generaciones siguientes. Todo gen situado en el territorio del GnRH gozará de pareja estabilidad, y ello aunque su importancia no alcance la de la hormona. Por tanto, el gen SH, cuya función sigue ignorándose, ha cabalgado a cuestas del éxito evolutivo del gen GnRH. Si otros segmentos de ADN de la hebra supuestamente sin sentido resultaran tenerlo, también colaborarían en la configuración del destino evolutivo de sus vecinos de enfrente, amén de compartirlo.

Nueva superconductividad

¿Qué teoría explica mejor la razón de que ciertos óxidos cerámicos presenten superconductividad a temperaturas que, hace sólo un año, se hubieran juzgado increíblemente elevadas? Al formularles esa pregunta, un grupo de científicos experimentales de los Laboratorios AT&T Bell, todos ellos directamente implicados en el desarrollo de nuevos materiales de propiedades poco comunes, se sonrieron. "Según la última teoría que he oído, dijo Robert J. Cava, es que se trata de fragmentos de supernova caídos a la Tierra." En un tono más serio, otro físico señaló, con el asentimiento de sus colegas: "No conozco aún teoría alguna que pueda ayudarme a encontrar mejores superconductores".

Mientras los teóricos siguen preguntándose por la causa del buen funcionamiento de los nuevos superconductores, los físicos de laboratorio, valiéndose tenazmente de la metodología del ensayo y error, siguen mejorando sus prestaciones. No hace aún el año, el pasado otoño científicos del Laboratorio IBM de Investigación de Zürich iniciaron lo que hoy todos consideran una revolución de la física del estado sólido: informaron de que un compuesto cerámico de lantanio, bario y óxido de cobre superconducía a temperaturas de hasta 28 grados Kelvin. La marca anterior, de 23 grados, se había mantenido imbatida durante más de 10 años. En febrero, varios grupos habían descubierto que un compuesto de itrio, bario y óxido de cobre poseía una T_c, o temperatura superior de superconductividad, que rebasaba los 90 grados Kelvin.

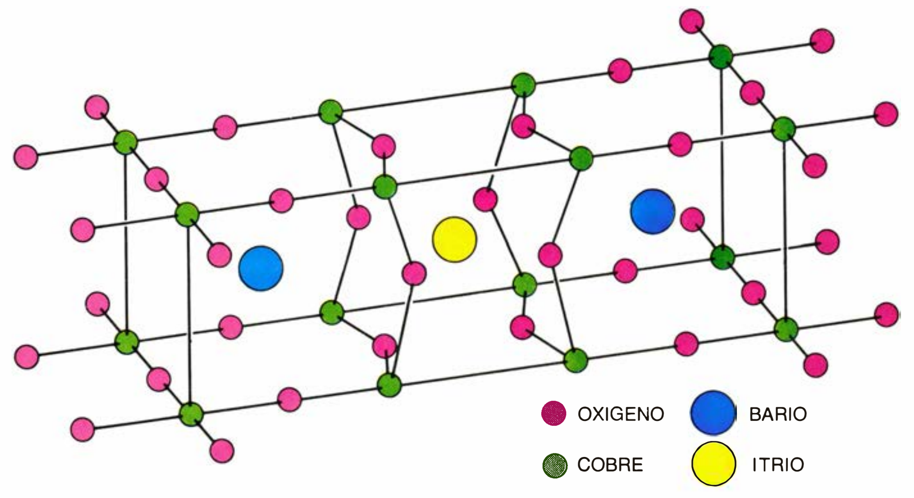
Desde entonces, otras fuentes han confirmado el hallazgo y, sustituyendo el itrio por distintos elementos, han descubierto una docena larga de compuestos que presentan superconductividad en esa misma gama de temperaturas. A diferencia de los superconductores ordinarios, que deben refrigerarse con helio líquido (hierve a 4,2 grados Kelvin), los nuevos compuestos pueden enfriarse con nitrógeno líquido (que lo hace a 77 grados Kelvin), casi tan barato como el agua mineral. Por consiguiente, los costes de los sistemas superconductores podrían reducirse varios órdenes de magnitud.

Como las demás cerámicas, esos materiales son quebradizos, pese a lo cual se ha logrado obtenerlos en forma de hilos delgados y flexibles, primer paso hacia el desarrollo de líneas de conducción, motores, generadores, imanes y dispositivos de almacenamiento eléctrico. Por medio de técnicas de deposición de partículas como las utilizadas en la fabricación de pastillas electrónicas, varios grupos han obtenido ya películas delgadas que, entre otras aplicaciones, podrían emplearse para la conexión entre circuitos integrados, lo que facilitaría el diseño de ordenadores más rápidos y compactos. No cabe duda de que esos avances parecen aventurar cambios espectaculares que incidirán sobre un vasto abanico de sectores económicos.

El análisis de la microestructura de los nuevos materiales ha brindado algunos indicios sobre el posible mecanismo por medio del cual superconducen a tan elevadas temperaturas. Varios laboratorios han preparado muestras monofásicas del compuesto de itrio y, dirigiendo contra ellas haces de rayos X, de electrones y de otras formas de radiación, han determinado su estructura molecular. La unidad fundamental es una perovskita (un cristal cúbico común en muchos minerales y compuestos sintéticos) formado por capas de óxido de cobre, bario e itrio.

Los átomos de oxígeno de la estructura presentan una disposición poco habitual que, en opinión de los investigadores, desempeña un papel de primer orden en la superconducción. A veces, pero no siempre, faltan átomos de oxígeno en algunas posiciones de la unidad. Por tanto, el subíndice que corresponde al número de átomos de oxígeno de la unidad no es un entero, sino que se sitúa justo por debajo de 7. Otra propiedad importante de la estructura es su anisotropía: según parece, sólo permite la conducción en dos dimensiones, a lo largo de las capas de óxido de cobre, pero no por las capas, intercaladas, de óxido de bario o de itrio.

Los teóricos se están esforzando en relacionar esos hallazgos con conocidas hipótesis sobre el funcionamiento de los superconductores. El modelo que goza de mayor predicamento es la teoría BCS, denominada así por los tres premios Nobel que la propusieron, hace 30 años: John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer. Según defiende esa teoría, se registra superconductividad cuando los electrones se emparejan en los denominados pares de Cooper, lo cual reduce su susceptibilidad a la dispersión térmica. Creíase que tal apareamiento sólo podría darse a muy bajas temperaturas. Se determinó que el mecanismo de apareamiento de los superconductores de baja temperatura disponibles a la sazón ex-



2. PEROVSKITA CON DEFICIT DE OXIGENO, que forma una unidad cristalina de óxido de itrio, bario y cobre, un compuesto cerámico que superconduce por encima de los 90 grados Kelvin. Se ha deducido su estructura a partir de los ensayos de dispersión de neutrones efectuados en el Laboratorio Nacional estadounidense Argonne. Los oxígenos de dos láminas de óxido de cobre del centro de la unidad se doblan hacia un átomo de itrio. Falta oxígeno en dos lados de los "cuadrados" que cierran la unidad por ambos extremos, razón por la cual sus cobres y oxígenos forman cadenas unidimensionales.

plotaba las vibraciones acústicas de la red cristalina, a saber, los fonones. A menudo, y erróneamente, se considera que los fonones forman parte integrante de la teoría BCS, pero no es así; en realidad, la teoría no especifica cómo se produce el apareamiento.

Hasta la fecha nada ha amenazado seriamente la premisa fundamental de la teoría. Por el contrario, los científicos han preferido centrar sus esfuerzos en reflexionar sobre cómo podrían los fonones provocar el acoplamiento a 90 grados Kelvin, o bien en proponer un mecanismo distinto. El problema de los fonones es que en los superconductores de bajas temperaturas establecen un enlace relativamente poco energético, que las vibraciones térmicas rompen con facilidad.

En efecto, en ensayos recientes efectuados en los Laboratorios AT&T Bell, se han planteado dudas sobre el papel que corresponde a los fonones en la superconducción a altas temperaturas. En esas pruebas se sustituyó los oxígenos normales del compuesto de itrio por isótopos pesados de oxígeno. Puesto que los fonones no podrían imprimir una vibración de igual energía a los isótopos pesados del oxígeno, la T_c descendería en función del grado con que los fonones indujeran la superconductividad del material. Los primeros resultados, según Bertram Batlogg, de AT&T, indican que la sustitución isotópica no influye sobre la T_c del compuesto de itrio.

Schrieffer, actualmente en la Universidad de California en Santa Bárbara, había sostenido que los fonones podrían intervenir en la conducción a elevadas T_c "si se les empujara con intensidad suficiente" algún otro mecanismo. Según dice, le causa gran satisfacción que los resultados de AT&T sugieran un mecanismo absolutamente nuevo para la superconducción a elevadas T_c: "La Madre Naturaleza lo ha logrado de nuevo".

Bardeen, el antiguo colega de Schrieffer, hoy en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, sospecha que, a temperaturas elevadas, los mecanismos de acoplamiento podrían ser electrónicos, provocados por lo que se ha venido a llamar excitón. Esa "partícula virtual" parece estar fomada por un electrón asociado al hueco de carga positiva que deja cuando emigra. La teoría del excitón, conjunto de razonamientos desarrollados a principios de la década de 1960, fue sometida a refinamiento por parte de Bardeen y otros colegas en 1973. Según Bardeen, sobre el papel ofrece una explicación verosímil del modo de alcanzar elevadas T_c: su punto débil es que no se dispone de pruebas directas sobre la existencia de los excitones.

Probablemente el teórico más original —y batallador— de los que se han participado en el debate sea Philip W. Anderson, de la Universidad de Princeton. Sobre los excitones, Anderson opina: "Esa teoría era falsa cuando se propuso y sigue siéndolo hoy". La suya, postulada poco después del descubrimiento del nuevo tipo de materiales superconductores, propone que el acoplamiento de los electrones no se efectúa por atracción electrónica, sino por interacción magnética entre electrones de espín opuesto. "La clave reside en la repulsión de los electrones", afirma. "No se aman, sino que se odian."

Uno de los obstáculos que se oponen a la teoría de Anderson es su dificultad. "Anderson tiene buenas ideas, afirma Theodore H. Geballe, de Stanford, pero cuesta entenderlas." A otro científico, la propuesta de Anderson le "suena a música celestial".

Todos parecen coincidir, al menos porque se han esfumado ya ciertas trabas que desde hace tiempo se oponían a ello, en que resulta posible la superconductividad a temperatura ambiente. Abundan los rumores. De la Universidad estatal Wayne procede un informe especialmente interesante. Investigadores de ese centro aplicaron una corriente de radiofrecuencia a un compuesto de óxido cerámico a 240 grados Kelvin, sólo 33 grados Celsius bajo cero, y advirtieron que la muestra generaba un potencial de corriente continua. Tal fenómeno sólo debería darse en los superconductores. Sin embargo, la muestra no superó otros ensayos de superconductividad.

Patrick A. Lee, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, es uno de los pocos teóricos que ofrecen un motivo específico del esperado incremento de T_c. Señala que, en los superconductores ordinarios, la razón entre la energía que liga los electrones en parejas y la T_c es constante: 3,53; cuando la "energía de enlace" asciende, también debe hacerlo T_c. Sin embargo, los ensayos efectuados en los nuevos superconductores de 90 grados señalan que la energía de enlace resulta demasiado elevada para la T_c en un factor de dos o más. Lee mantiene que el peculiar comportamiento bidimensional de los nuevos superconductores en realidad limita sus posibilidades. Según ese autor, si los físicos remiendan el material para que su superconducción se produzca de modo algo más tridimensional, la T_c podría incrementarse mucho más.

Modelos climáticos

¿Producirá el efecto de invernadero otro "tazón de polvo"? ¿Traerá la guerra nuclear un "invierno nuclear"? Los modelos informáticos del clima terrestre ofrecen indicaciones sobre el futuro de éste

Stephen H. Schneider

El clima terrestre cambia. El actual difiere muchísimo del que dominaba hace 100 millones de años, cuando los dinosaurios se enseñoreaban del planeta y las plantas tropicales florecían a altas latitudes; difiere incluso de lo que era hace 18.000 años, cuando los hielos cubrían una zona extensísima del hemisferio Norte. Con toda seguridad, continuará modificándose en el futuro. En parte, la evolución se verá impulsada por causas naturales, como las fluctuaciones en la órbita terrestre. Pero los cambios climáticos que sobrevengan, a diferencia de los registrados en el pasado, tendrán probablemente también una nueva fuente: la actividad humana. Tal vez estemos experimentando ya los efectos de haber ensuciado la atmósfera con el dióxido de carbono y otros gases. Los efectos de una guerra nuclear podrían ser mucho más dramáticos.

¿Cómo puede la sociedad humana prepararse para un futuro climático tan incierto? Obviamente, la posibilidad de predecir dicho futuro con algún detalle sería de gran ayuda, pero en eso estriba el problema: los procesos que constituyen un clima planetario son demasiado grandes y complicados para poder reproducirlos físicamente en experimentos de laboratorio. Por suerte, sí pueden simularse matemáticamente con el auxilio de un ordenador. En otras palabras, en lugar de construir una analogía física del sistema tierra-océano-atmósfera, se pueden idear expresiones matemáticas de los principios físicos que gobiernan el sistema (la conservación de la energía, por ejemplo, y los principios de la dinámica de Newton) y dejar después que el ordenador calcule cómo evolucionará el clima de acuerdo con tales leyes. Los modelos matemáticos del clima no pueden simular la complejidad entera de la realidad, pero alcanzan a revelar las consecuencias lógicas de hipótesis plausibles acerca del clima. Como mínimo, constituyen un gran paso más allá de la pura especulación.

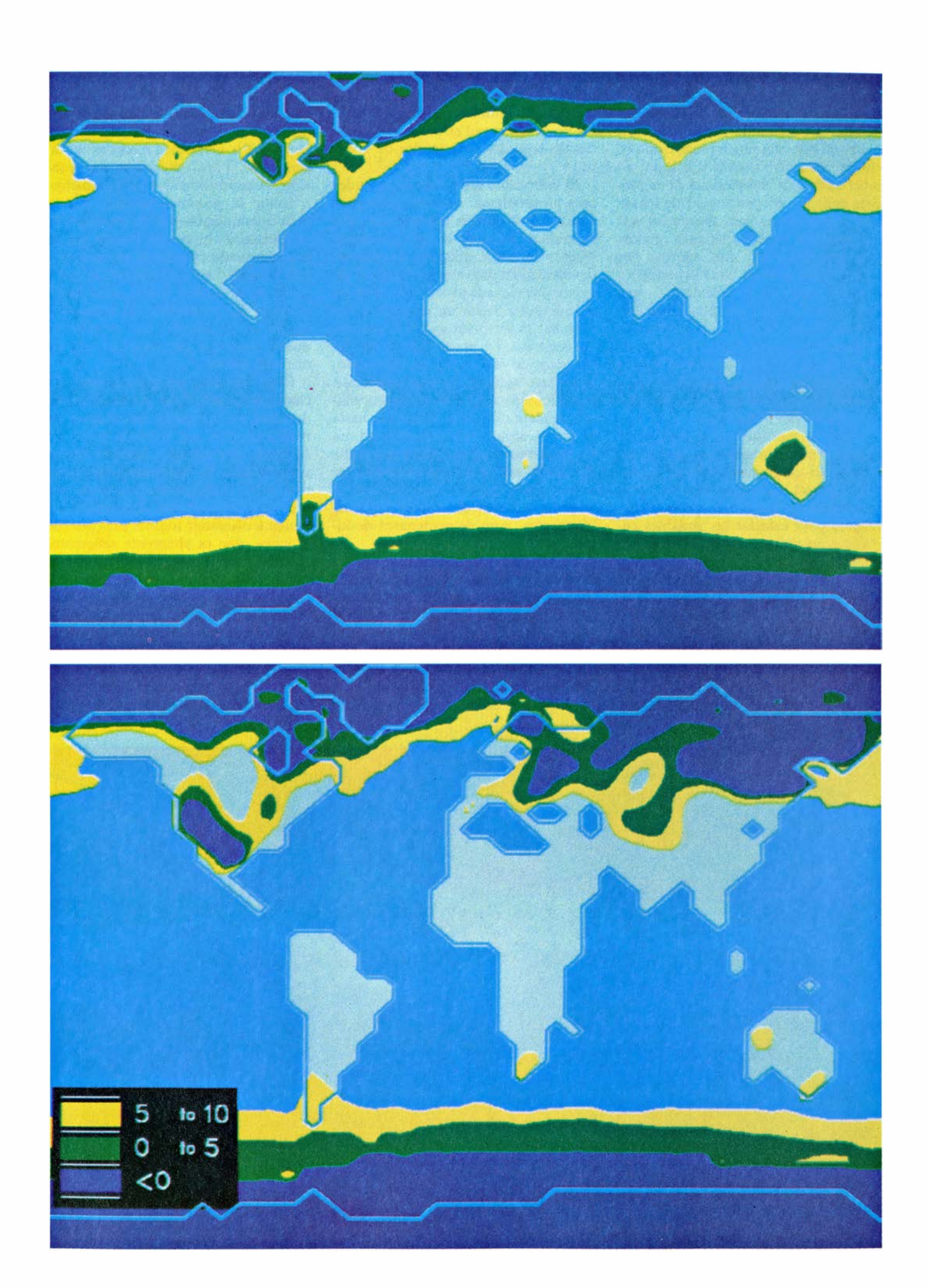
Se han usado modelos matemáticos para simular el clima actual; por ejemplo, para estudiar los efectos sobre la atmósfera de erupciones volcánicas, tales como la de El Chichón. Se recurre también a ellos para explicar la evolución de los climas del pasado; verbigracia, los correspondientes a los períodos glaciales y al período cretácico (la parte final de la era de los dinosaurios). El grado de exactitud de las simulaciones paleoclimáticas, a su vez, da confianza a los investigadores que emplean los mismos modelos para simular climas futuros y a los que, en particular, tratan de explorar los impactos potenciales de la contaminación antropogénica y de la guerra nuclear. En este contexto, la elaboración de modelos climáticos está emergiendo como un campo de interés, que supera el estricto marco académico: se está convirtiendo en una herramienta básica para determinar dónde residen los intereses nacionales.

Elementos básicos

Aunque todos los modelos climáticos consisten en representaciones matemáticas de procesos físicos, la composición precisa de un modelo y su complejidad dependen del problema que aborda. En particular, tiene que ver con la duración del período, en el pasado o en el futuro, que se pretende simular. Algunos de los procesos que influyen sobre el clima son muy lentos: el crecimiento o la retirada de glaciares y bosques, por ejemplo, los movimientos de la corteza terrestre o el transporte de calor desde la superficie del océano hasta sus profundidades. Un modelo proyectado para predecir el tiempo de la semana próxima ignora esas variables, usando los valores presentes (la extensión de la superficie cubierta por los hielos, por ejemplo) como "condiciones de contorno", externas e invariables. Tal modelo se limita a simular los cambios atmosféricos. Por otra parte, un modelo elaborado para simular la docena aproximada de períodos glaciales e interglaciales del último millón de años debe incluir todos los procesos anteriores, y más.

Los modelos climáticos varían también en su resolución espacial, esto es, en el número de dimensiones que simulan y la cuantía de detalle espacial que abordan. Un modelo de extraordinaria sencillez es el que calcula sólo la temperatura media de la Tierra, independiente del tiempo, como balance energético que proviene de la reflectividad media de la Tierra y del efecto medio "de invernadero" de la atmósfera. Tal modelo se llama de dimensión cero, pues concentra la distribución real de temperatura de la Tierra en un único valor, su promedio global. En cambio, los modelos climáticos tridimensionales reproducen la variación de la temperatura con la latitud, la longitud y la altitud. Los más complicados reciben la denominación de modelos de circulación general. Predicen la evolución, con el tiempo, de la temperatura, la humedad, la dirección y la velocidad del viento, la humedad del suelo y otras variables climáticas.

1. SIMULACION DE UNA GUERRA NUCLEAR estallada en el mes de julio. Desencadenaría "heladas relámpago", generales aunque transitorias, en el hemisferio Norte, de acuerdo con los trabajos realizados por el autor y Starley L. Thompson, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica. El mapa presenta las temperaturas calculadas por el modelo en superficie (en grados Celsius), en un día normal en julio (*arriba*), y en el último día de una guerra nuclear de diez días de duración (*abajo*). La simulación supone que los incendios provocados por 6500 megatones de bombas producirían 180 millones de toneladas métricas de humo capaz de ocultar el sol. Los efectos de enfriamiento son locales porque el humo no es continuo y porque dependen del tiempo local. De aquí que una simulación general no pueda predecir la temperatura para un lugar y momento específicos; sólo alcanza a sugerir la clase de cambios que una guerra nuclear acarrearía.


5 to 10
0 to 5
<0

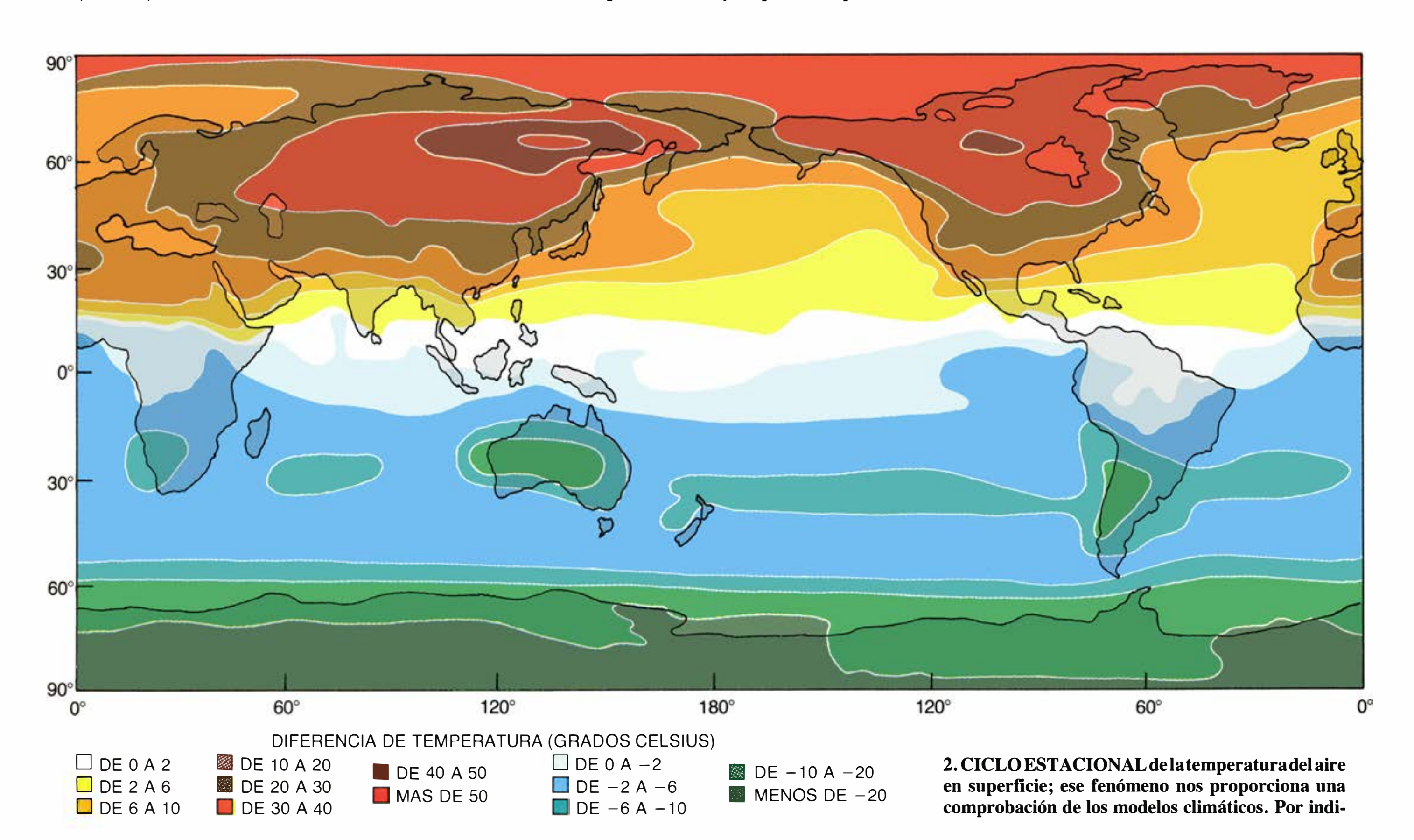
Los modelos de circulación general son, por lo común, más amplios y detallados, en cuanto a los datos que incluyen, que los modelos más sencillos; pero son también mucho más caros en cuanto a su elaboración y cálculo. El nivel óptimo de complejidad de un modelo depende del problema y de los recursos disponibles para abordarlo; más no significa necesariamente mejor. Con frecuencia hay que empezar por un problema con un modelo sencillo y emplear después los resultados para guiar una investigación más detallada. Decidir la complejidad que debe tener un modelo para un objetivo dado —es decir, hasta dónde sacrificar lo exacto y completo en aras de lo tratable y económico— es más un juicio de valor que de estricto orden científico.

Hasta el modelo más complejo de circulación general presenta grandes limitaciones en cuanto al grado de detalle espacial que puede resolver. Ningún ordenador alcanza la velocidad suficiente para calcular las variables climáticas en todos los puntos de la superficie de la Tierra y en la atmósfera en un período de tiempo razonable. De ahí que los cálculos se realicen en puntos alejados que forman una rejilla tridimensional en la superficie terrestre y por encima de ésta. El modelo que usan el autor y sus colegas en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (CNIA) de Boulder en Colorado tiene una rejilla con nueve niveles superpuestos, hasta una altura de 30 kilómetros. El intervalo horizontal entre los nudos de la red es de unos 4,5 grados de latitud y siete grados de longitud.

El intervalo o espaciado entre nudos crea un problema: muchos fenómenos climáticos de interés son menores que la celdilla básica de la red. Las nubes ofrecen un buen ejemplo. Al reflejar, devolviéndola nuevamente hacia el espacio, una elevada proporción de la radiación solar incidente, ayudan a determinar la temperatura en la superficie terrestre. La predicción de las variaciones de nubosidad es, por tanto, una parte esencial de una simulación climática fidedigna. Sin embargo, ningún modelo climático disponible hasta ahora (y, según toda probabilidad, en los próximos decenios) tiene una malla de finura suficiente para resolver las nubes individuales, que tienden a adquirir tamaños del orden de pocos kilómetros, y no de centenares de kilómetros.

La solución del problema de los fenómenos de tamaño inferior a la malla está en representarlos de forma colectiva, en vez de uno por uno. El método empleado recibe el nombre de parametrización. Consiste en obtener, mediante datos climatológicos, relaciones estadísticas entre las variables que son resueltas por la red y aquellas que no lo son. Por ejemplo, la temperatura y humedad medias sobre una superficie extensa (pensemos en el tamaño de una celdilla de la malla) pueden relacionarse con la nubosidad media sobre tal superficie; para determinar la ecuación, debe introducirse un parámetro, o factor de proporcionalidad, que se deduce empíricamente de los datos de temperatura y humedad. Puesto que un modelo puede calcular la temperatura y la humedad en las celdas de la red a partir de principios físicos, será capaz también de pronosticar la nubosidad media en la celdilla, aun cuando no pueda aventurar qué sucederá con las distintas nubes.

Para simular completamente un clima, el modelo debe tomar en consideración los complejos mecanismos de realimentación que influyen sobre él. La nieve, por ejemplo, tiene un efecto perturbador, de realimentación positiva, sobre la temperatura: cuando una ola de frío trae nevadas, la temperatura tiende a disminuir todavía más porque la nieve, que es altamente reflectora, absorbe menos energía solar que el suelo. Este proceso se ha parametrizado bastante bien en los modelos climáticos. Por desgracia, otros bucles de realimentación no se conocen con igual precisión. De nuevo, las nubes son un caso arquetipo. Se forman sobre regiones cálidas y húmedas de la superficie terrestre; ahora bien, de acuerdo con



2. CICLO ESTACIONAL de la temperatura del aire en superficie; ese fenómeno nos proporciona una comprobación de los modelos climáticos. Por indi-

las circunstancias, pueden producir un efecto estabilizador, es decir, de realimentación negativa (enfriando la superficie, al impedir el paso de la luz solar), o positiva (calentando la superficie al aprisionar el calor).

Sensibilidad climática

La incertidumbre acerca de importantes mecanismos de realimentación es una de las razones por las cuales el objetivo último de la construcción de modelos climáticos —la predicción fidedigna de los futuros valores de variables clave, tales como las distribuciones de temperatura y de lluvia— resulta todavía irrealizable. Otra fuente de incertidumbre externa a los modelos mismos reside en el comportamiento humano. Así, para predecir el impacto que las emisiones de dióxido de carbono producirán sobre el clima, debería conocerse la cantidad de dióxido de carbono que se va a emitir.

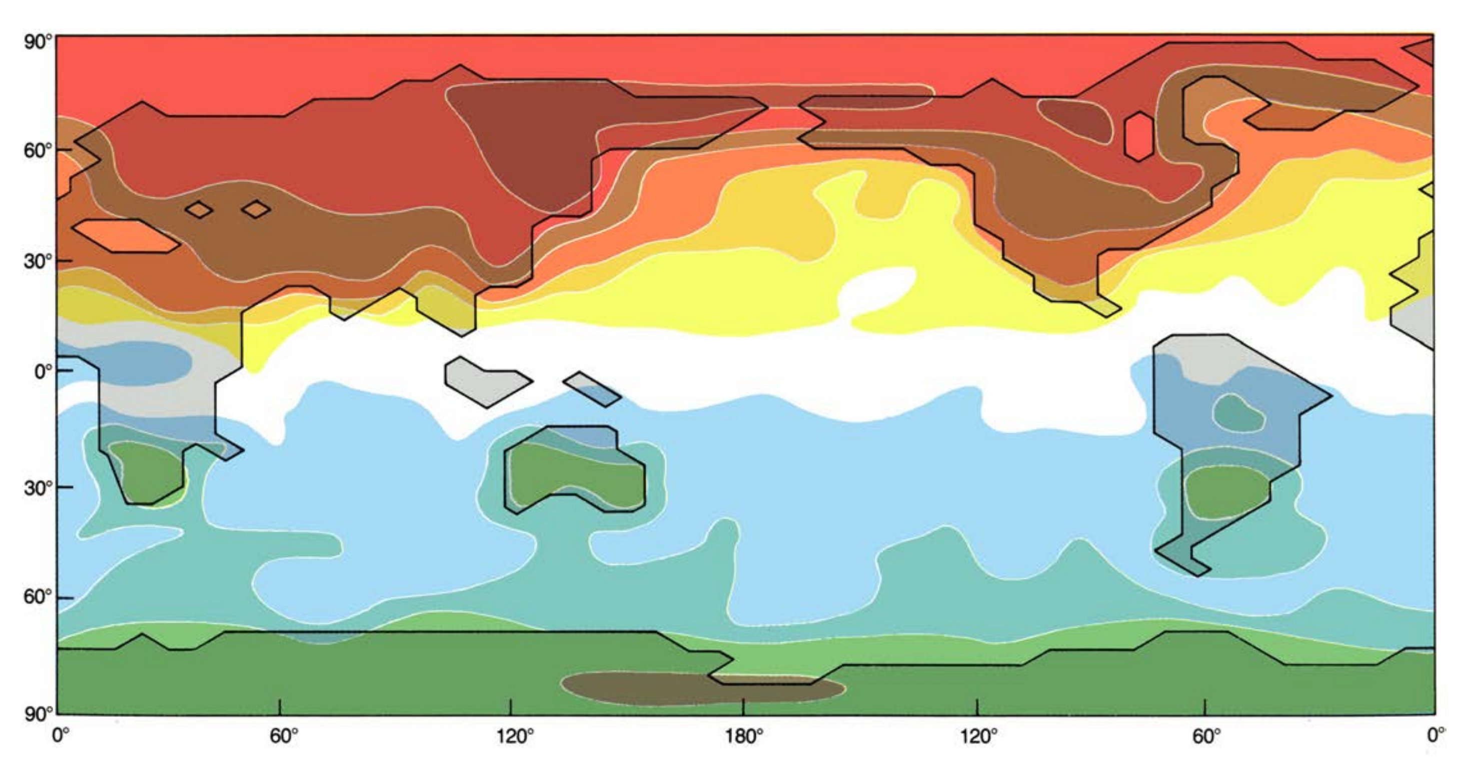
Lo que sí pueden hacer los modelos es analizar la sensibilidad del clima con respecto a algunas variables inciertas o imprevisibles. En el problema del dióxido de carbono, se podría construir un conjunto de casos plausibles de crecimiento económico, tecnológico y de población, y emplear un modelo para evaluar las consecuencias climáticas de cada caso. Los factores climáticos cuyos valores correctos son inciertos (tales como el parámetro de realimentación de las nubes) podrían dejarse variar dentro de un dominio plausible de valores. Los resultados indicarían cuál de los factores inciertos adquiere mayor importancia en hacer sensible el clima a un aumento del dióxido de carbono; se podría entonces centrar la investigación en esos factores. Los resultados darían también alguna idea sobre el margen de futuros climáticos al que podrían las sociedades verse forzadas a adaptarse. Cómo responder a tal información es, por supuesto, una cuestión política.

Tal vez la pregunta que provoca mayor perplejidad acerca de los modelos climáticos es la de si se puede confiar en ellos lo suficiente para que sirvan de base para regular las emisiones de dióxido de carbono y adoptar otras medidas de parecido tenor. ¿Cómo comprobar las predicciones de modelos tan cargados de incertidumbres? Hay varios métodos. Ninguno de ellos, por sí solo, basta; pero, juntos, pueden proporcionar pruebas importantes (aunque circunstanciales) sobre la credibilidad de un modelo.

El primer método consiste en comprobar la capacidad del modelo para simular el clima actual. El ciclo estacional constituye un buen banco de pruebas, porque los cambios de temperatura que lleva consigo son grandes: varias veces mayores, en promedio, que el tránsito de un período glacial a otro interglacial. Los modelos de circulación general se comportan notablemente bien en la reproducción del ciclo estacional, lo que parece indicar que estamos en el buen camino. La comprobación estacional, sin embargo, no aclara la bondad de un modelo en la simulación de procesos lentos, verbigracia, las variaciones en la superficie cubierta por los hielos, que pueden tener un importante efecto a largo plazo.

Un segundo método de verificación estriba en aislar distintas componentes físicas del modelo, tales como sus parametrizaciones, y someterlas a comprobación con los datos obtenidos de la realidad. Por ejemplo, se puede comprobar si la parametrización de la nubosidad por parte del modelo concuerda con el nivel de nubosidad apropiado en una determinada celdilla de la red. Esta comprobación tropieza con una dificultad: no puede garantizar que se hayan tratado adecuadamente las complejas interacciones entre muchas componentes del modelo. Este puede resultar bueno para predecir la nubosidad media y malo para representar la realimentación por nubes. En ese caso, la simulación de la respuesta climática general al aumento del dióxido de carbono, por tomar una variable, será probablemente defectuosa.

Para determinar el grado de acierto de la simulación general y a largo



cador del ciclo se entiende la diferencia entre las temperaturas de verano y las de invierno. En la ilustración se comparan las diferencias de temperatura observadas entre agosto y febrero (*izquierda*) con las diferencias calculadas por un modelo tridimensional (*derecha*) elaborado por Syukuro Manabe y Ronald Stouffer, del Laboratorio estadounidense de Dinámica de Fluidos Geofísicos. El modelo reproduce la mayor parte de los caracteres reales con notable exactitud.

plazo, disponemos de un tercer método: comprobar la capacidad del modelo para reproducir los climas, muy diferentes, de la Tierra primitiva o incluso de otros planetas. Las simulaciones paleoclimáticas que describiré más abajo revisten un interés intrínseco como ejercicios de comprensión de la historia terrestre. En cuanto comprobaciones de los modelos climáticos, son también cruciales para aventurar su futuro.

La historia reciente

A John E. Kutzbach y sus colegas, de la Universidad de Wisconsin en Madison, debemos una de las simulaciones paleoclimáticas de mayor éxito de entre las realizadas hasta la fecha. Kutzbach pretendía explicar el período más cálido de la reciente historia climática, el llamado "óptimo climático", que tuvo lugar hace entre 9000 y 5000 años. Durante ese intervalo, a juzgar por las indicaciones de fósiles y de otros datos geológicos, las temperaturas estivales en los continentes septentrionales superaban, en varios grados Celsius, las actuales en Africa y Asia, y los monzones eran más intensos.

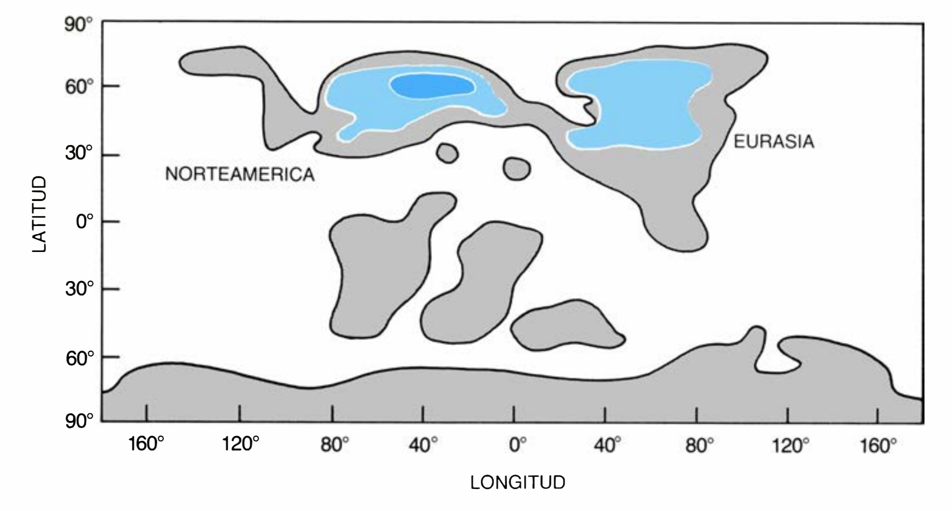
La simulación de Kutzbach mostró que las diferencias climáticas recibían explicación mediante dos pequeñas diferencias en la órbita terrestre: una inclinación ligeramente mayor del eje de rotación y la ocurrencia de máximo acercamiento al Sol en junio, y no en enero como ocurre ahora. Esas dos diferencias juntas habrían aumentado la amplitud del ciclo estacional en el hemisferio Norte. Hace 9000 años, éste recibía aproximadamente un 5 por ciento más energía solar en verano y en torno a un 5 por ciento menos en invierno de la que le llega ahora. Como en verano la diferencia de temperatura entre mares y tierras era mayor, la distribución de vientos resultaba distinta y las lluvias monzónicas adquirían mayor intensidad.

El éxito de Kutzbach nos estimuló a quienes trabajábamos en el CNIA, pues había empleado el mismo modelo tridimensional básico que nosotros. Starley L. Thompson y el autor han recurrido al modelo para explicar el clima notablemente diferente que prevaleció dos milenios antes del óptimo climático. Hace unos 11.000 años, la Tierra acababa de escapar de las zarpas del último período glacial. Gran parte de la flora y fauna de climas más cálidos había comenzado a retornar a las latitudes septentrionales, sobre todo en Europa occidental. Entonces, bruscamente, cayó de nuevo sobre esta parte del planeta un enfriamiento de intensidad casi glacial. El período frío duró 1000 años; se conoce como el Nuevo Dryas, nombre de una flor ártica.

El enfriamiento durante el Nuevo Dryas alcanzó su máxima intensidad en la región del Atlántico Norte, señaladamente en la costa occidental de Europa y en Inglaterra. Esta configuración sugiere una causa oceánica. Algunos paleoclimatólogos, entre ellos William F. Ruddiman y Andrew McIntyre, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, defienden que, paradójicamente, la razón última del Nuevo Dryas fue la rápida ruptura de los hielos en Europa y Norteamérica, hace entre 12.000 y 10.000 años. Esta ruptura habría arrojado una gran cantidad de agua dulce en el Atlántico Norte. Como el agua dulce se congela mas fácilmente que la salada, la intrusión de agua procedente de la fusión de hielos pudo dar lugar a una amplia capa de hielos sobre el océano que habría bloqueado la rama septentrional de la Corriente del Golfo, responsable del calentamiento del noroccidente europeo.

Para comprobar esta hipótesis, Thompson y el autor desarrollaron una simulación climática en la que toda la superficie del Atlántico Norte, hasta la latitud de 45 grados, se suponía congelada; no porque creyeran que eso era lo que había ocurrido durante el Nuevo Dryas, sino como recurso para determinar la sensibilidad del clima a los hielos marinos. Los resultados apoyan la hipótesis. Durante el verano, el efecto refrigerante del Atlántico Norte congelado se nota principalmente a lo largo de la costa europea; la influencia dominante de las temperaturas tierra adentro es el intenso sol de verano. Durante el invierno, en cambio, cuando el calentamiento solar remite y la Corriente del Golfo mantiene un clima templado en Europa occidental, al generar brisas marinas cálidas, la cobertura de hielo marino conduce a enfriamientos intensos y generalizados.

Otros investigadores, particularmente un grupo del Instituto Goddard de Estudios Espaciales, han obtenido resultados similares empleando modelos diferentes. Los mapas de distribución de temperatura producidos por los modelos concuerdan, a grandes rasgos, con los datos geológicos disponibles. Incluso sugieren dónde deberían insistir los paleoclimatólogos en su busca de nuevos datos que contribuyan a reforzar la hipótesis de los hielos marinos, así como los propios modelos. Estos predicen, por ejemplo, que un nuevo incremento en la cantidad de hielos marinos produciría sólo un ligero efecto refrigerante en los veranos de la Unión Soviética; el modelo de Goddard, que incorpora los efectos de los hielos europeos residuales, predice, en realidad, veranos más cálidos en la Unión Soviética. Predicciones que podrían comprobarse analizando polen fosilizado, para determinar qué clase de plantas florecían en la región durante el Nuevo Dryas.



3. CLIMA DEL PERIODO CRETACICO: era mucho más cálido que el nuestro. Las pruebas del archivo fósil sugieren que la temperatura en los continentes septentrionales permanecía por encima de cero grados, incluso en invierno. (Los continentes aparecen en las posiciones que aproximadamente ocupaban hace 100 millones de años.) El mapa representa un intento de modelar este clima cálido, suponiendo que las corrientes oceánicas transportaban mucho más calor que ahora, de manera que la temperatura en la superficie del mar era de al menos 20 grados Celsius. Bajo esta hipótesis extrema, las temperaturas de enero habrían descendido hasta casi el punto de congelación (*color claro*) o inlcuso por debajo (*oscuro*) en Norteamérica y Eurasia.

El Cretácico

A mediados del Cretácico, unos 100 millones de años atrás, crecían plantas tropicales de anchas hojas en las latitudes medias, en lo que ahora son zonas templadas. Cerca del círculo polar

ártico que, al igual que la Antártica, parece haber estado libre de hielos permanentes, medraban los caimanes. Los niveles del mar se elevaban varios centenares de metros. Los datos señalan que la temperatura en el interior de los continentes permanecía por encima de cero, incluso en invierno.

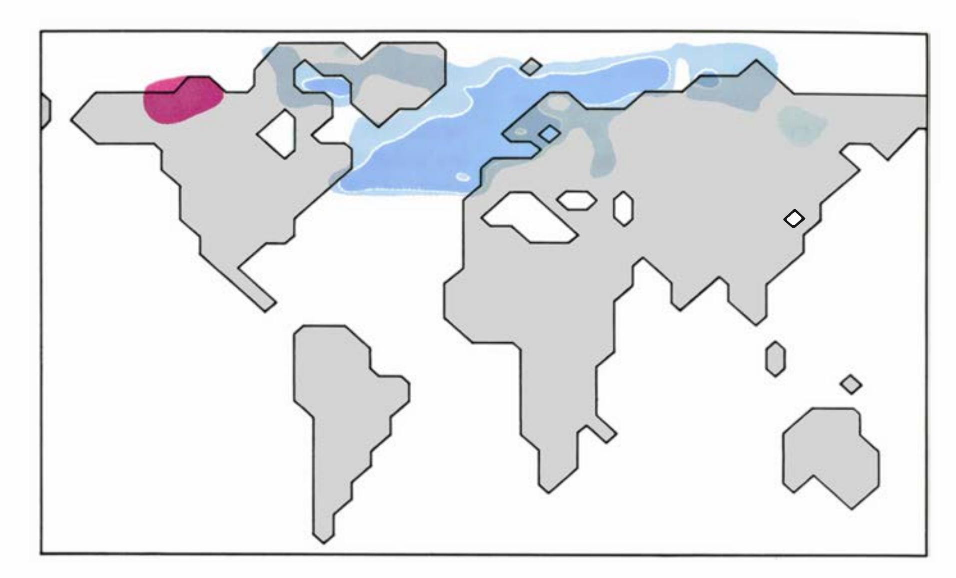
¿Qué fenómeno podría explicar una era tan cálida? De acuerdo con una hipótesis, el transporte de calor por las corrientes oceánicas, que ayuda a distribuir el exceso de energía solar recibida en la vecindad del Ecuador, era más eficaz en el Cretácico. Los continentes estaban, entonces, en posiciones diferentes, de modo que las corrientes oceánicas debieron ser también distintas.

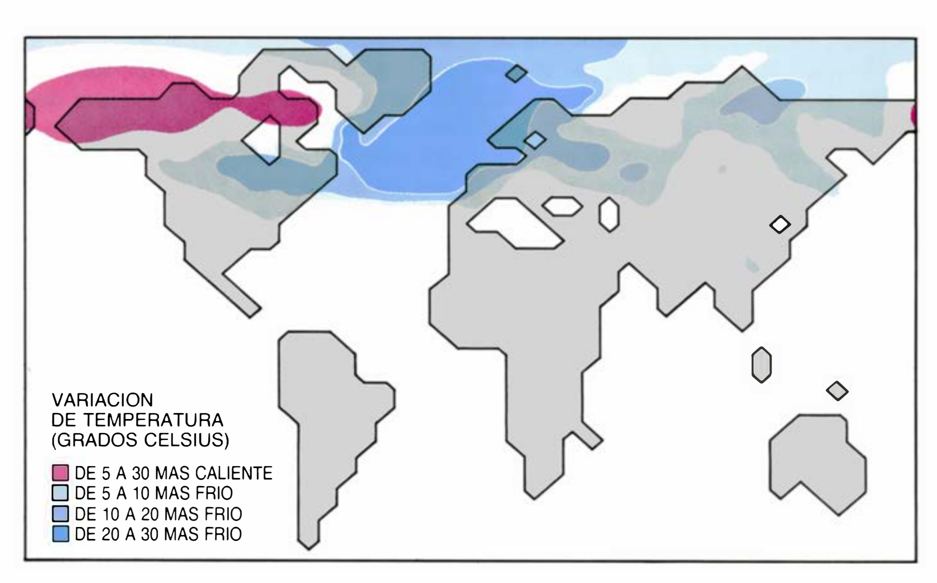
Eric J. Barron, hoy en la Universidad de Pennsylvania, y Warren M. Washington, del CNIA, sometieron a prueba esta hipótesis con un modelo climático tridimensional. No modelaron explícitamente el transporte de calor en el océano; supusieron, por el contrario, que la temperatura de la superficie del mar era en todas partes de 10 grados al menos, lo que implicaba un gran transporte de calor hacia los polos. Hallaron que, en oposición a la interpretación usual de los datos geológicos, las latitudes medias continentales todavía se enfriaban en invierno y que la temperatura caía bastante por debajo de cero grados Celsius en la Antártida. Barron, Thompson y el autor llevaron a cabo una simulación que incorporaba una hipótesis más extrema (y menos realista): un océano que transportaba el calor con tal éxito que su temperatura era en todas partes de 20 grados ¿Qué ocurrió? Pues que la discrepancia entre el modelo y los datos aportados por la geología se hizo mayor: la parte central de los continentes septentrionales se tornaba más fría en invierno.

La verdad es que esto no debiera sorprendernos. Al fijar la temperatura de la superficie del mar en un valor globalmente uniforme de 20 grados, se había eliminado el gradiente de temperatura entre el Ecuador y los polos, que es la principal fuerza impulsora de la circulación atmosférica de la Tierra. Consiguientemente, los vientos del modelo resultaban demasiado flojos para transportar mucho calor hacia los continentes. Para someter a prueba la hipótesis de que un transporte oceánico más intenso produjo el clima cálido del Cretácico, necesitábamos un modelo más realista.

De aquí que realizáramos un grupo adicional de simulaciones en las que las temperaturas en la superficie del mar se calculaban explícitamente, pero a las que nunca se les permitía bajar de 20 grados, ni siquiera en los polos. Con la temperatura de los océanos tropicales ahora entre 25 y 30 grados Celsius, el modelo incorporaba un apreciable gradiente de temperatura. En consecuencia, sus vientos adquirían mayor intensidad. Y sin embargo, aun cuando el modelo de planeta en conjunto era bastante más cálido de lo que es la Tierra hoy, no lo era en cuantía suficiente. Se encontraban temperaturas bajo cero distribuidas ampliamente por el interior de los continentes. Estaba claro que ni los océanos cálidos ni el transporte de calor reforzado que habíamos postulado bastaban para compensar el hecho de que, en invierno, los continentes reciben poca energía solar y radian mucho calor hacia el espacio.

El autor y sus colaboradores tienen la firme sospecha de que algún otro mecanismo debe haber ayudado a mantener cálido el clima del Cretácico. En nuestra opinión, el mejor candidato sería un efecto de invernadero reforzado y debido a la presencia en la atmósfera de altos niveles de dióxido de carbono. Este punto de vista se apoya en recientes modelos geoquímicos. El dióxido de carbono y otros gases escapan del interior de la Tierra, a través, sobre todo, de las grietas oceánicas, donde dos de las placas que constituyen la superficie terrestre se separan permitiendo el ascenso de roca fundida para llenar el hueco. La mayoría de los investigadores están conformes en que el Cretácico medio era una época de rápido movimiento de las placas, por lo que debieron producirse altas emisio-





4. NUEVO DRYAS: período de espectacular enfriamiento que comenzó, bruscamente, hace unos 11.000 años, cuando la Tierra se estaba calentando tras el último período glacial. El retroceso, que conoció su máxima intensidad a lo largo de la costa noroccidental de Europa, pudo venir desencadenado por la formación de una extensa capa de hielo en el Atlántico Norte. Los mapas muestran las simulaciones, realizadas en el CNIA, de los cambios de temperatura que se darían si la superficie del Atlántico se mantuviese helada desde el polo hasta 45 grados de latitud Norte. En verano (*arriba*), el efecto refrigerante del hielo marino se notaría principalmente a lo largo de la costa, pero en invierno (*abajo*) cubriría una zona de mayor extensión.

nes de dióxido de carbono. Los modelos geoquímicos sugieren que la atmósfera pudo entonces haber contenido entre cinco y diez veces más dióxido de carbono que ahora. En su forma extrema, el Cretácico prefiguraría el tipo de clima que los humanos estamos hoy en proceso de crear.

El moderno efecto de invernadero

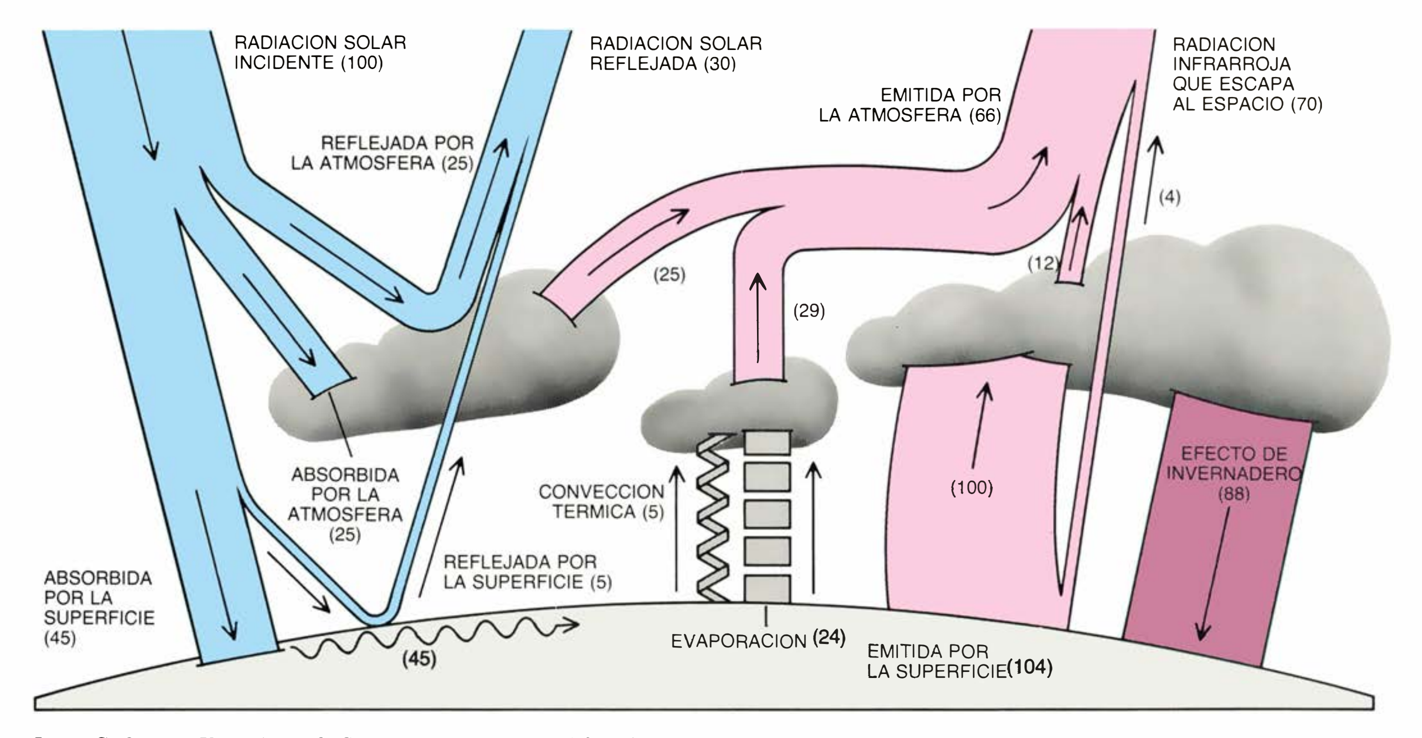
No hay duda de que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha estado creciendo; se cifra en torno a un 25 por ciento más alta que hace un siglo. También goza de amplia aceptación la idea según la cual, cuando aumenta la concentración de dióxido de carbono, se eleva la temperatura en la superficie de la Tierra. El dióxido de carbono, bastante transparente a la luz visible, se convierte en eficaz absorbente de la radiación infrarroja de onda larga emitida por la Tierra. De aquí que tienda a aprisionar el calor en la vecindad de la superficie. En esto consiste el efecto de invernadero, de cuya existencia no cabe dudar. Explica las altas temperaturas de Venus (cuya espesa atmósfera consta principalmente de dióxido de carbono), así como las frías condiciones de Marte (con una atmósfera de dióxido de carbono muy tenue).

Lo que no está claro es la cantidad precisa de calentamiento ni la distribución regional de cambio climático que pueden esperarse en la Tierra de un aumento apreciable de la concentración de dióxido de carbono y de otros gases que contribuyan al afecto de invernadero. (El efecto acumulativo de los halocarbonos, los óxidos de nitrógeno, el ozono y otros gases escasos podría ser comparable con el del dióxido de carbono a lo largo del próximo siglo.) Esta distribución regional de las variaciones de temperatura, precipitaciones y humedad del suelo determinarán el impacto que el efecto de invernadero producirá sobre los ecosistemas, la agricultura y los recursos hídricos.

Varios investigadores han intentado modelar los posibles impactos climáticos del dióxido de carbono. La mayoría de ellos han seguido el mismo camino: dan al modelo un incremento inicial de dióxido de carbono (duplicando, por lo general, la concentración atmosférica), dejan evolucionar al modelo hasta que alcanza un nuevo equilibrio térmico y comparan el nuevo clima con el que ha servido de partida. En uno de los resultados de mayor resonancia, Syukuro Manabe, Richard T. Wetherald y Ronald Stouffer, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL) de la Universidad de Princeton, han determinado que tanto la duplicación como la cuadruplicación del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera crearían, en verano, una "zona seca" en el cinturón granero de Norteamérica y aumentaría la humedad del suelo en los cinturones monzónicos. Este modelo alcanzó su nuevo equilibrio tras varias décadas de tiempo simulado.

En la realidad, sin embargo, la tendencia hacia el equilibrio sería, con probabilidad, mucho más lenta. El modelo del GFDL omitía el transporte horizontal de calor en el océano, así como el transporte vertical de calor desde la capa superficial bien mezclada hasta las profundidades oceánicas. Ambos procesos retardarían la llegada al equilibrio térmico; la transición real tardaría, verosímilmente, más de un siglo. El transporte de calor en los océanos afectaría también a la respuesta de la temperatura ante un incremento gradual, más parecido a la realidad, de la concentración de los gases del efecto de invernadero, en lugar de una inyección brusca y única.

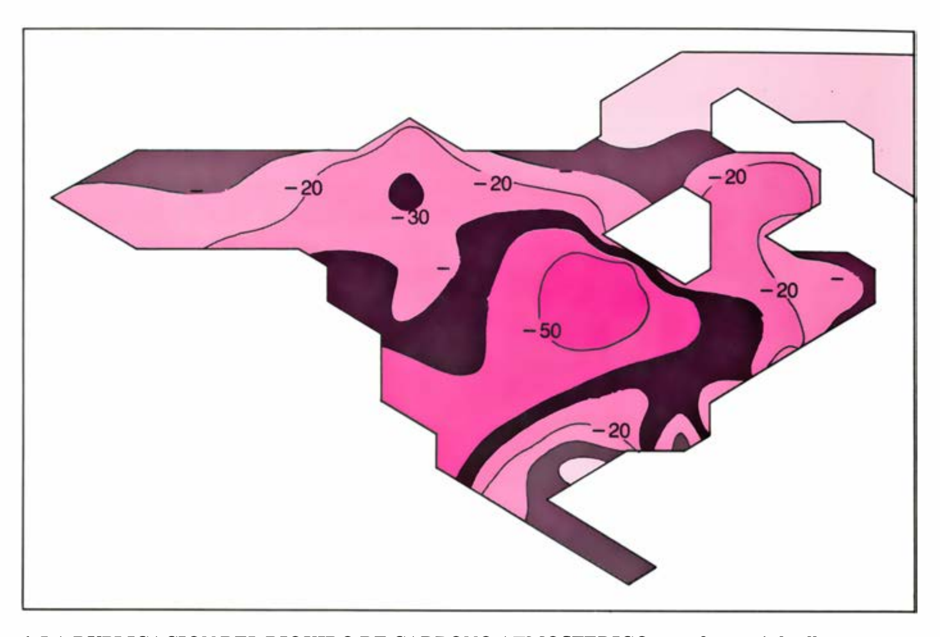
En 1980, Thompson y el autor desarrollaron unos modelos unidimensionales sencillos que demostraron la importancia de la fase transitoria de calentamiento. Las regiones sitas a diferentes latitudes se acercaron al equilibrio a distintas velocidades, por la razón principal de que incluían cantidades diversas de tierra firme; los continentes se calientan antes que los océanos. De aquí que, durante la fase transitoria, el calentamiento y otros fenómenos climáticos inducidos por el efecto de invernadero reforzado podrían muy bien mostrar distribuciones mundiales que se alejarían bastante de las deducidas partiendo de simulaciones de equilibrio. Además, el impacto



5. EFECTO DE INVERNADERO. Se produce porque la atmósfera tiende a aprisionar calor cerca de la superficie. El dióxido de carbono, el vapor de agua y otros gases son bastante transparentes a las longitudes de onda del visible e infrarrojo próximo (*azul*), que transportan la mayor parte de la energía solar, aunque absorben mejor longitudes de onda mayores, en el infrarrojo lejano (*rojo*), emitidas por la Tierra. En gran parte, esta energía se reemite hacia abajo (*rojo oscuro*). De aquí que un incremento en la concentración atmosférica de gases capaces de contribuir al efecto de invernadero caliente la superficie.

social de los cambios climáticos llegaría probablemente a su máximo muy pronto, antes de que se hubiera alcanzado el equilibrio y antes de que los humanos hubieran tenido oportunidad de adaptarse a su nuevo entorno.

Para representar adecuadamente la fase transitoria, sería necesario combinar un modelo tridimensional de la atmósfera con otro tridimensional de los océanos que incluyera los efectos de los transportes vertical y horizontal de calor. Se ha experimentado con ciertos modelos acoplados, pero ninguno durante tiempo suficiente para simular el siglo venidero. Los modelos acoplados, demasiado caros para esta labor, no merecen crédito todavía. Cuando mejoren, podrá establecerse con mayor confianza la distribución de los impactos de los niveles crecientes de gases de invernadero. Mientras tanto, sólo contamos con una prueba circunstancial de que la importancia que pueden adquirir los impactos: la Tierra ha elevado en 0,5 grados la temperatura que registraba un siglo atrás.



6. LA DUPLICACION DEL DIOXIDO DE CARBONO ATMOSFERICO transformaría las llanuras centrales de Norteamérica en una zona seca en verano, según un modelo elaborado por Manabe y Stouffer. El mapa muestra la variación en porcentaje de la humedad del suelo (para el período que abarca de junio a agosto) que resultaría una vez la atmósfera del modelo hubiera alcanzado un nuevo equilibrio térmico.

El invierno nuclear

Los esfuerzos encaminados a modelar qué efectos, a un plazo relativamente corto, podrían derivarse de una guerra nuclear, si bien se hallan exentos de las dificultades del modelo oceánico de los estudios del efecto de invernadero, llegan a unos resultados cargados de incertidumbres. Desde que Paul J. Crutzen, del Instituto Max Planck de Química en Mainz, y John W. Birks de la Universidad de Colorado en Boulder, realizaron los primeros cálculos, en 1982, ha quedado claro que el humo de los miles de incendios producidos por explosiones nucleares podría impedir el paso de una importante porción de la radiación solar. El primer intento, y el más conocido también, de modelar las variaciones de la temperatura superficial fue el estudio TTAPS, así llamado por las iniciales de sus autores [véase "Efectos climáticos de una guerra nuclear", por Riehard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, James B. Pollack y Carl Sagan; INVESTIGACIÓN y CIENCIA, octubre de 1984]. El estudio TTAPS predecía que las temperaturas de los continentes descenderían entre 20 y 40 grados tras una guerra nuclear a gran escala y plausible, en la que explosionaran 5000 megatones. Puesto que el enfriamiento se prolongaría muchos meses, pareció justificado denominarlo "invierno nuclear".

Desde el comienzo, los autores del estudio TTAPS admitieron las deficiencias de su modelo. Había tres de peso. En primer lugar, el modelo prescindía de los vientos: era un modelo monodimensional que representaba sólo la estructura vertical de la atmósfera. Prescindía, en segundo lugar, de los océanos: las predicciones de los enfriamientos en tierra se hicieron para un planeta integramente continental, omitiendo así el efecto suavizante del calor transportado tierra adentro por los vientos que soplan desde los océanos. Finalmente, el modelo dejaba de lado las estaciones, pues usaba un promedio anual de la energía solar recibida. En pocas palabras, el estudio TTAPS era un trabajo provisional cuyas conclusiones habría que modificar.

Algunas de las primeras correcciones vinieron de un estudio realizado por Curt Covey, Thompson y el autor usando el modelo tridimensional del CNIA. Como era de esperar, hallamos que los océanos mitigaban el efecto de enfriamiento de la nube de humo nuclear. En las porciones centrales de los continentes en latitudes medias del hemisferio Norte, el descenso medio de temperatura correspondiente al mes de julio fue en nuestra simulación aproximadamente la mitad del descenso predicho por el estudio TTAPS; a lo largo de las costas occidentales, el descenso reducíase a la décima parte. Además, la variación de temperatura mostró una estrecha relación con las estaciones. El enfriamiento se agudizaba en la hipótesis exclusiva de que la guerra nuclear se desencadenase en la primavera o verano septentrionales. Si la guerra comenzara en otoño o invierno, cuando las latitudes septentrionales ya reciben poca radiación solar, las consecuencias climáticas serían pequeñas.

No obstante, nuestro resultado más importante fue confirmar la conclusión básica del TTAPS relativa a la gravedad de los efectos climáticos producidos por un conflicto nuclear. Aun cuando la disminución media de temperatura fuese mucho menor que la predicha por el estudio TTAPS, nuestro modelo mostraba que el enfriamiento local podía alcanzar valores espectaculares. Bastaban unos días de humo denso cubriendo el cielo para bajar la temperatura de la superficie del suelo hasta casi los cero grados en pleno verano. Tales "heladas relámpago" transitorias podrían producirse en cualquier lugar de las latitudes afectadas por la guerra —en Texas, por ejemplo—, contando incluso con que el tamaño global de la nube nuclear de humo fuese varias veces menor de lo que había supuesto el grupo TTAPS. La ubicación de las heladas relámpago dependería de las condiciones locales del tiempo. En concreto, las heladas se darían donde el aire no alcanzase la humedad suficiente para producir niebla y los vientos no soplaran con fuerza bastante para deshacer las inversiones de superficie (capas estables). Los efectos climáticos de la guerra se distribuirían, pues, mediante una suerte de ruleta meteorológica.

Estudios más recientes (realizados por Thompson, el grupo de Michael C. MacCraken, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, y el grupo de Robert C. Malone, del Laboratorio

Nacional de Los Angeles) han confirmado nuestros resultados básicos. Habíamos encontrado heladas localizadas, aun cuando las limitaciones del modelo habían obligado a admitir que la nube inicial de polvo estaría uniformemente distribuida entre 30 y 70 grados Norte. En simulaciones posteriores, más acordes con la realidad, la guerra generaría espesas manchas nubosas que implicarían condiciones de helada, a medida que avanzaran sobre el hemisferio Norte.

El más plausible de los cálculos recientes muestra un descenso medio de temperatura sobre la Tierra de entre 10 y 15 grados Celsius para una guerra declarada en verano. En otro lugar he sugerido que sería más apropiado hablar de "otoño nuclear" que de "invierno nuclear" para aludir a tales cambios climáticos; al acuñar esa frase no pretendía evocar un cuadro agradable y con la vistosidad cromática de las hojas de los árboles en el otoño septentrional. Un otoño nuclear en julio podría, como el otoño hace cada año, acabar con la época de crecimiento de las plantas en gran parte del hemisferio Norte. Incluso en regiones donde la temperatura no bajase de cero grados, la desorganización de las lluvias monzónicas podría acarrear desastrosas consecuencias sobre los recursos alimentarios. De hecho, mientras los modelos climáticos más refinados han ido reduciendo las estimas originales de los efectos de enfriamiento de una guerra nuclear, ha ido aumentando la conciencia general de que la biosfera puede ser altamente sensible incluso a pequeñas perturbaciones climáticas.

Además, los efectos climáticos de una guerra nuclear no quedarían limitados, quizás, a las primeras semanas tras el fin de la contienda. En verano sobre todo, algunas de las formaciones nubosas de humo tenderían a ascender hasta la estratosfera, produciendo, con el tiempo, un tenue velo de humo, bastante uniforme, que podría cubrir la totalidad del hemisferio Norte durante meses. Parte del humo se extendería también hacia el sur del Ecuador. El velo provocaría intensas heladas anormales a fines de primavera o a principios de otoño. Al enfriar ligeramente los continentes septentrionales, podría causar también una importante reducción en las vitales lluvias monzónicas. Los conocimientos científicos actuales sugieren que, tras una guerra nuclear, la Tierra no quedaría para los insectos, y la especie humana, casi con certeza, no se extinguiría. Pero los efectos climáticos podrían, pese a ello, resultar calamitosos y extender las secuelas de la guerra a miles de millones de personas que vivieran lejos de las zonas directamente implicadas.

Puntos oscuros

Dicho esto, no deseo minimizar los puntos oscuros de que están salpicadas todas las simulaciones del invierno nuclear. Como se ha explicado más arriba, la exactitud de un modelo climático no puede demostrarse de manera concluyente; puede sólo comprobarse a través de datos circunstanciales, tales como la capacidad del modelo para simular climas del pasado o ciclos estacionales. En el caso del invierno nuclear, la mayor fuente de incertidumbre reside, no en lo que los modelos incluyen, sino en lo que han tenido que omitir.

Por ejemplo, ningún modelo climático puede predecir cuánto humo se producirá en el primer día de una guerra nuclear, o a qué altura ascenderán los penachos; los valores de variables tan importantes se deben tomar como hipótesis. Si el humo asciende a una altura de varios kilómetros, quedará por encima de la mayor parte del vapor de agua de la atmósfera, y la lluvia lo irá eliminando con extremada lentitud. En tal caso, la probabilidad de efectos climáticos graves y generalizados a todo el hemisferio será alta. Por el contrario, si la lluvia elimina el humo a un ritmo mayor que el supuesto en la mayoría de los modelos, bajaría la probabilidad de un desastre climático a escala hemisférica.

La cuestión del invierno nuclear ilustra un punto general sobre el que quisiera insistir. Los modelos climáticos no producen predicciones definitivas acerca de lo que el futuro nos deparará; se limitan a fabricar una bola de cristal sucia donde puede vislumbrarse cierto número de posibilidades. Con ello plantean un dilema: hemos de decidir hasta cuándo continuar limpiando el cristal antes de tomar medidas relacionadas con lo que nos parece ver dentro.

El dilema reviste tal vez menos dificultad en el caso de la guerra nuclear, cuyas consecuencias serían catastróficas en cualquier circunstancia, que en el caso de la contaminación atmosférica. En el momento presente, estamos alterando nuestro entorno a un ritmo más rápido que el del avance de nuestra comprensión de los cambios climáticos resultantes. Si esta tendencia no se detiene, llegaremos a comprobar si los modelos climáticos tienen o no razón: lo haremos por medio de un experimento real y global de cuyas consecuencias no podremos escapar.

Glucosa y envejecimiento

Considerado antaño inerte, el azúcar más abundante del organismo puede alterar ciertas proteínas, contribuyendo así al deterioro general que acompaña al envejecimiento

Anthony Cerami, Helen Vlassara y Michael Brownlee

A medida que envejecemos, nuestras células y tejidos van experimentando cambios que llevan al deterioro y muerte del organismo. Las células pierden eficacia y capacidad para reparar el material dañado; simultáneamente, los tejidos van ganando en rigidez. Por dar un ejemplo: los pulmones y el músculo del corazón se expanden menos eficazmente, los vasos sanguíneos se endurecen y los ligamentos y tendones se tensan. Los ancianos tienen también mayor predisposición a desarrollar cataratas, aterosclerosis y cáncer, entre otras enfermedades.

Pocos investigadores atribuirían esos efectos diversos a una sola causa. No obstante, los autores han descubierto que un proceso muy conocido, utilizado en la decoloración y endurecimiento de alimentos, podría contribuir al deterioro de las células y los tejidos asociado a la edad. Se trata de la unión química de la glucosa con las proteínas (y, según hemos descubierto, con los ácidos nucleicos). La unión enzimática de la glucosa con las proteínas se produce en un sitio específico, sobre una molécula determinada y para un fin concreto. Por el contrario, el proceso no enzimático añade glucosa al azar sobre cualquiera de los sitios que se ofrecen a todo lo largo de cualquier cadena polipeptídica.

Fundados en recientes estudios *in vitro* e *in vivo* desarrollados en nuestro laboratorio de la Universidad de Rockefeller, proponemos que esa "glicosilación" no enzimática de ciertas proteínas desencadena, en el organismo, una serie de reacciones químicas que culminan en la formación y acumulación final de enlaces cruzados ("crosslinks") irreversibles entre moléculas proteicas adyacentes. Si la hipótesis se demostrara correcta, ayudaría a explicar por qué diversas proteínas, en particular las que constituyen la estructura de los tejidos y órganos, se van entrecruzando de forma progresiva a medida que las personas envejecen. Aunque hasta ahora nadie ha descrito satisfactoriamente el origen de esos puentes, muchos investigadores coinciden en que el entrecruzamiento generalizado de proteínas contribuye probablemente al endurecimiento y la pérdida de elasticidad característicos de los tejidos envejecidos. También nosotros sugerimos que la adición no enzimática de glucosa a ácidos nucleicos puede deteriorar gradualmente el ADN.

Los químicos especialistas en alimentación conocen desde hace décadas las etapas del proceso de alteración de las proteínas por parte de la glucosa; sin embargo, hasta hace poco eran escasos los biólogos conscientes de que esos mismos procesos podían desarrollarse también en el organismo. Las reacciones no enzimáticas entre la glucosa y las proteínas, denominadas en su conjunto reacción de Maillard, o de oscurecimiento, parecen complicadas, pero son bastante sencillas si se comparan con muchas reacciones bioquímicas.

Comienzan con la atracción mutua entre un grupo aldehído (CHO) de la glucosa y un grupo amino (NH_2) de una proteína. Las moléculas se combinan y forman lo que se conoce por base de Schiff [*véase la figura 3*], producto inestable que rápidamente y de modo espontáneo evoluciona hacia una situación más estable, si bien todavía reversible: la formación de compuestos conocidos por productos Amadori.

Si una proteína permanece en el organismo durante meses o años, algunos de esos productos Amadori se van deshidratando poco a poco y sufren una postrer transformación —en nuevas estructuras derivadas de la glucosa. Pueden éstas combinarse con diversos tipos de moléculas para dar lugar a formas irreversibles, que hemos denominado productos finales de glicosilación avanzada (AGE, por *advanced glycosylation end products*). En su mayoría, los AGE presentan un color pardo amarillento, son fluorescentes y exhiben propiedades espectrográficas específicas. Y más importante aún para el organismo: muchos pueden establecer enlaces cruzados con las proteínas adyacentes.

Se desconoce la estructura química precisa de los productos finales de glicosilación avanzada y de la mayoría de los derivados AGE. No obstante, algunas pruebas sugieren que, a menudo, los AGE se forman por la unión de un producto Amadori con la glucosa o con otro azúcar. Tales productos finales podrían tender puentes con otras proteínas uniéndose a los grupos amino. En ocasiones podrían fusionarse dos productos Amadori, originando un AGE que es otro entrecruzado. El único entrecruzado derivado de la glucosa del que se conoce la estructura química constituye precisamente un ejemplo de ese tipo. Se trata del 2-furanil-4(5)-(2-furanil)-1*H*-imidazol, o FFI. Aislado inicialmente en el laboratorio (de una mezcla del aminoácido lisina, la proteína albúmina y la glucosa), el FFI se ha encontrado ya en el organismo.

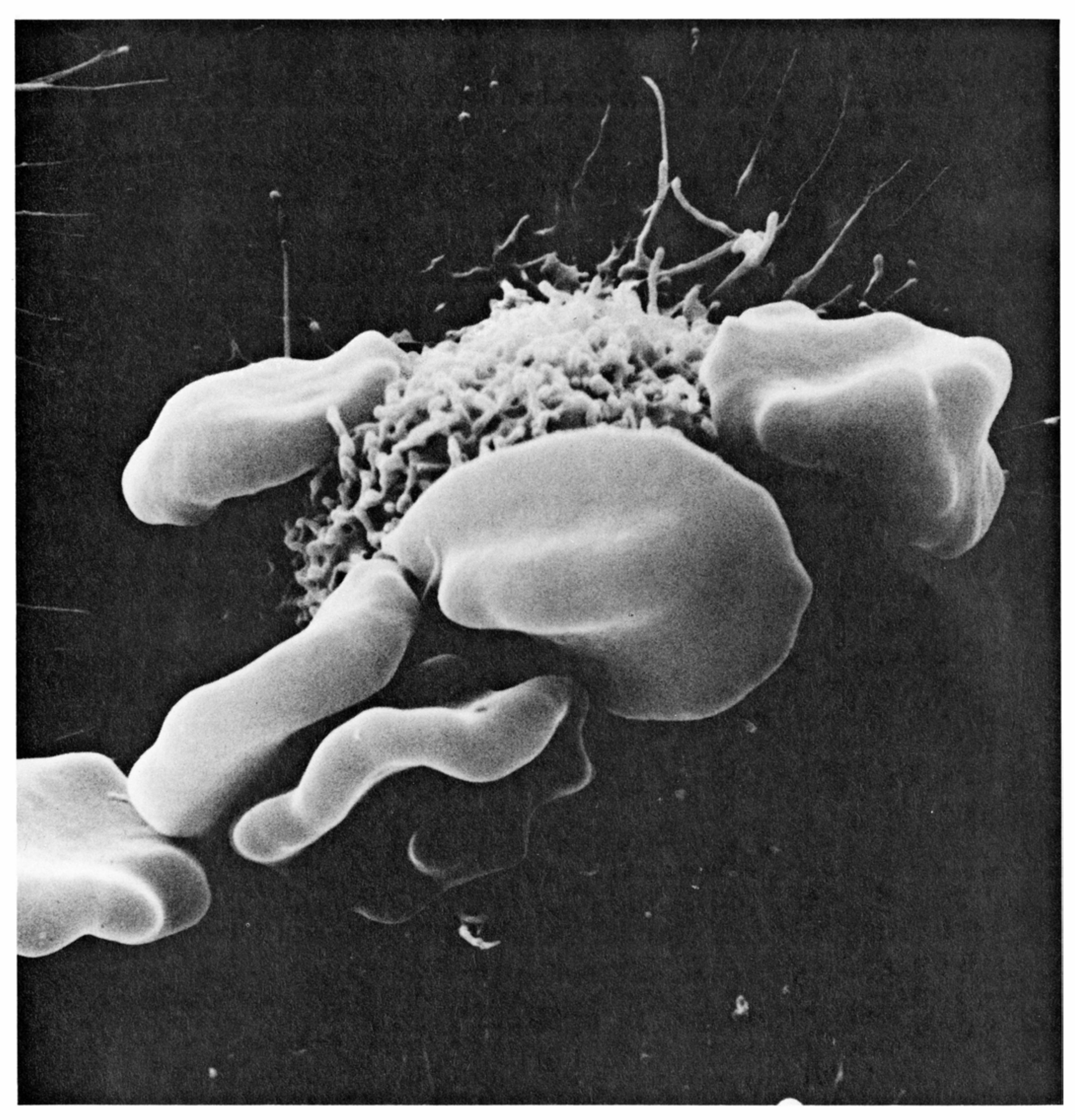
Del estudio de la diabetes, una enfermedad caracterizada por la presencia de elevados niveles de glucosa en la sangre, se derivó la convicción de que la reacción de oscurecimiento podía transcurrir también en el organismo, y de que incluso podía dañarlo. A mediados de la década de 1970, uno de los autores (Cerami) y Ronald J. Koenig leyeron un trabajo según el cual la sangre de los diabéticos contenía niveles superiores a los normales de hemoglobina A_{1c}: una variante de la hemoglobina, el componente proteico de los glóbulos rojos encargado de transportar oxígeno. Interesados por el motivo de esa elevación de los niveles de la proteína, decidieron determinar su estructura.

La hemoglobina A_{1c} es un producto Amadori. Además, como es el caso de

la mayoría de los productos Amadori formados en los alimentos, la cantidad de hemoglobina A_{1c} viene condicionada por el nivel de glucosa en sangre: cuando es alto, también lo es la cantidad de productos Amadori. (Investigadores de nuestro laboratorio y de otros han identificado desde entonces más de 20 proteínas Amadori en el hombre y, como cabía esperar, su concentración en los diabéticos duplicaba o triplicaba la presentada por los no diabéticos.)

Los hallazgos de la hemoglobina revelan que la glucosa, que baña los tejidos y las células del organismo entero, no es la molécula biológicamente inerte que la mayoría de los biólogos creía. El azúcar no reacciona en su configuración cíclica, pero el anillo se abre lo bastante a menudo para permitir la formación de productos Amadori. La glucosa, el azúcar menos reactivo del organismo, tiene el mayor efecto potencial sobre las proteínas porque es, el más abundante.

La reactividad de la glucosa sugirió a Cerami que el exceso de ese azúcar en sangre en personas con diabetes incontrolada podría constituir algo más que un indicador de la enfermedad. Si el azúcar podía unirse a las proteínas del organismo en reacciones no sometidas



1. MACROFAGO (*cuerpo de superficie rugosa del centro*), célula que elimina desechos de los tejidos, a punto de ingerir glóbulos rojos (*discos lisos*) a los que se han unido productos finales de glicosilación avanzada, o AGE. Los AGE son moléculas derivadas de la combinación de glucosa y proteína sin participación de enzimas, proceso denominado, en su conjunto, reacción de Maillard, o de oscurecimiento. Los autores postulan que los AGE van acumulándose sobre células y proteínas de vida larga, formando enlaces cruzados que deterioran los tejidos. Los macrófagos retiran las proteínas alteradas, pero pierden eficacia con el envejecimiento del individuo. En esta micrografía, de David M. Phillips, del Population Council, las células aparecen aumentadas 10.000 diámetros.

al control enzimático, pensó, su presencia en cantidades excesivas quizá contribuyera a las complicaciones de la diabetes: el abanico de trastornos que van desde una sensación de malestar general hasta la insuficiencia renal, afección común entre los diabéticos, a los que acorta la vida. En concreto, parecía posible que la elevación de los niveles de glucosa actuara sobre las proteínas de vida larga, formándose abundantes productos terminales de glicosilación avanzada. A su vez, la acumulación de AGE modificaría de manera indeseable los tejidos del organismo.

Esas reflexiones hicieron pronto sospechar que la glucosa podría estar implicada en los cambios hísticos asociados con el envejecimiento normal. El efecto de la diabetes sobre muchos órganos y tejidos a menudo se describe como un envejecimiento acelerado, porque varias de las complicaciones que afectan a las personas que la sufren —cataratas seniles, rigidez muscular y aterosclerosis— son idénticas a las alteraciones que se presentan en la vejez; sencillamente, se desarrollan antes. Si, en efecto, el exceso de glucosa acelera el desarrollo de esos achaques en personas con diabetes, resulta razonable postular que, en cantidades normales, participe en la lenta aparición que se observa en los no diabéticos a medida que envejecen.

Los estudios de senescencia efectuados en nuestro laboratorio (que venían a complementar a los de diabetes) se abordaron con el propósito de determinar si, en verdad, los productos finales de la glicosilación avanzada se acumulaban en las proteínas de vida larga del organismo y provocaban la formación de estructuras de entrecruzamiento entre aquéllas. Nuestro primer objeto de trabajo fueron los constituyentes proteicos mayoritarios del cristalino del ojo pues, según se cree, esas proteínas se conservan de por vida; se ajustaban, por tanto, al modelo de proteínas susceptibles de acumular gran cantidad de productos finales de glicosilación avanzada. También parecía probable que la formación de esos AGE, y de entrecruzados derivados de los AGE, participara en el oscurecimiento y enturbiamiento del cristalino (es decir, en el desarrollo de cataratas seniles) que acompañan a la vejez. Venía a apoyar esa noción el descubrimiento, anterior, de la existencia de dos tipos de enlaces cruzados en los agregados proteicos del cristalino humano aquejado de cataratas seniles. Un enlace tenía color, señal de que podía tratarse de un AGE; el otro era una unión de tipo disulfuro formada entre los grupos sulfhidrilo (SH) del aminoácido cisteína.

En experimentos *in vitro*, Cerami, Victor J. Stevens y Vicent M. Monnier demostraron que, actuando sobre una solución de aquellas proteínas, la glucosa producía estructuras parecidas a las de las cataratas. Mientras que en ausencia de glucosa las soluciones que contenían cristalinos bovinos permanecían claras, cuando en las soluciones había glucosa se formaban agregados de proteínas, probable indicio de que entre las moléculas se habían establecido enlaces cruzados. Los agregados difractaban la luz y convertían en opaca la solución. Los análisis de los enlaces tendidos entre las moléculas confirmaron la presencia de ambos tipos: uniones disulfuro y pigmentadas. Ese mismo grupo descubrió también que, en el hombre, los enlaces pigmentados de las cataratas seniles eran de color parduzco y exhibían la característica fluorescente de los productos finales de la glicosilación avanzada. De hecho, se comprobó que algunos entrecruzamientos eran el producto de glicosilación avanzada FFI.

Junto con otras pruebas, los resultados anteriores sugieren que la glicosilación no enzimática de las lentes cristalinas puede contribuir a la formación de cataratas a través de dos mecanismos. La glucosa altera probablemente la configuración de las proteínas e insta el afloramiento de grupos sulfhidrilo antes ocultos, que devendrían susceptibles de combinación con otros grupos sulfhidrilo próximos. Se formarían entonces uniones disulfuro y se iniciaría la agregación proteica. Posteriormente se reorganizarían los productos Amadori de las proteínas, facilitándose la formación de FFI y otros enlaces pigmentados que decolorarían el cristalino y le conferirían opacidad.

Convencidos de que al menos un tipo de proteínas sufre la reacción de oscurecimiento y forma uniones no deseables, los autores y sus colaboradores centraron su atención en la proteína más abundante del organismo: el colágeno. Esa proteína extracelular de larga vida une entre sí las células de muchos órganos y colabora en la constitución del entramado que da forma y soporte a las paredes de los vasos sanguíneos. Es también el componente mayoritario del tendón, la piel, el cartílago y otros tejidos conjuntivos. En los últimos 25 años, diversos investigadores han demostrado que son muchos los tejidos donde se forma colágeno, y que su entrecruzamiento y rigidez aumentan con la edad.

Las primeras pruebas de que el colágeno podía acoger a los productos finales de la glicosilación avanzada se recabaron en estudios de la dura madre,

2. FORMACION de uniones entrecruzadas derivadas de la glucosa, mostrada de modo muy esquemático; comienza cuando la glucosa se une a un grupo amino (NH_2) de una proteína (*arriba*), por ejemplo el colágeno. El producto inicial, una base de Schiff, se transforma rápidamente en producto Amadori que, en última instancia, puede atravesar diversos estadios mal conocidos (*flecha discontinua*) y convertirse irreversible- comienza cuando la glucosa se une a un grupo amino (NH_2) de una proteína (*arriba*), por ejemplo el colágeno. cerrarse (*abajo*) sobre los grupos amino libres de alguna proteína próxima y formar enlaces entrecruzados.

GLUCOSA PROTEINA BASE DE SCHIFF PRODUCTO AMADORI ENTRECRUZADO DERIVADO DE GLUCOSA (FFI)

3. ESTRUCTURA QUIMICA de las bases de Schiff de glucosa y proteína y de los productos Amadori, que ya se ha descifrado. Queda por desentrañar la de la mayoría de los AGE y de los enlaces entrecruzados derivados de AGE, pero se ha identificado uno de ellos: el 2-furanil-4(5)-(2-furanil)-1*H*-imidazol, FFI.

la capa de colágeno que separa el cerebro del cráneo. Monnier, Cerami y el fallecido Robert R. Kohn, de la Universidad Case Western Reserve, demostraron que la dura madre de ancianos y diabéticos exhibía una coloración pardo amarillenta de propiedades fluorescentes y espectrográficas comparables con las de los productos finales de la glicosilación avanzada obtenidos *in vitro*. Como cabía esperar, las proteínas de personas afectas de diabetes habían acumulado más pigmento que las proteínas de no diabéticos. En estos útimos individuos la coloración de las proteínas aumentaba en proporción lineal a la edad.

Pruebas obtenidas en varios estudios sugieren que la glucosa no sólo induce en el colágeno la formación de AGE, sino también el establecimiento de uniones entrecruzadas. Por los trabajos de otros investigadores se conoce desde hace tiempo que, sometidas a tensión, cuesta más romper las fibras de los tendones de la cola de ratas viejas que las fibras de ejemplares jóvenes, indicio de que las fibras viejas están más entrecruzadas y son menos flexibles. Monnier, Cerami y Kohn intentaron imitar los efectos del envejecimiento incubando fibras de tendones de ratas jóvenes en presencia de varios azúcares. Las fibras acumulaban gradualmente los productos finales de la glicosilación avanzada y mostraban un aumento concomitante del tiempo de ruptura.

Más recientemente hemos analizado el establecimiento de uniones de entrecruzamiento en el colágeno purificado y en el aórtico. En el primer caso se incubó la proteína con glucosa en un tubo de ensayo; en el segundo caso se incubó esencialmente en el organismo de animales diabéticos que presentaban elevados niveles de glucosa en sangre. En ambas situaciones, los análisis demostraron inequívocamente que la glucosa provocaba la formación de un entrecruzado generalizado.

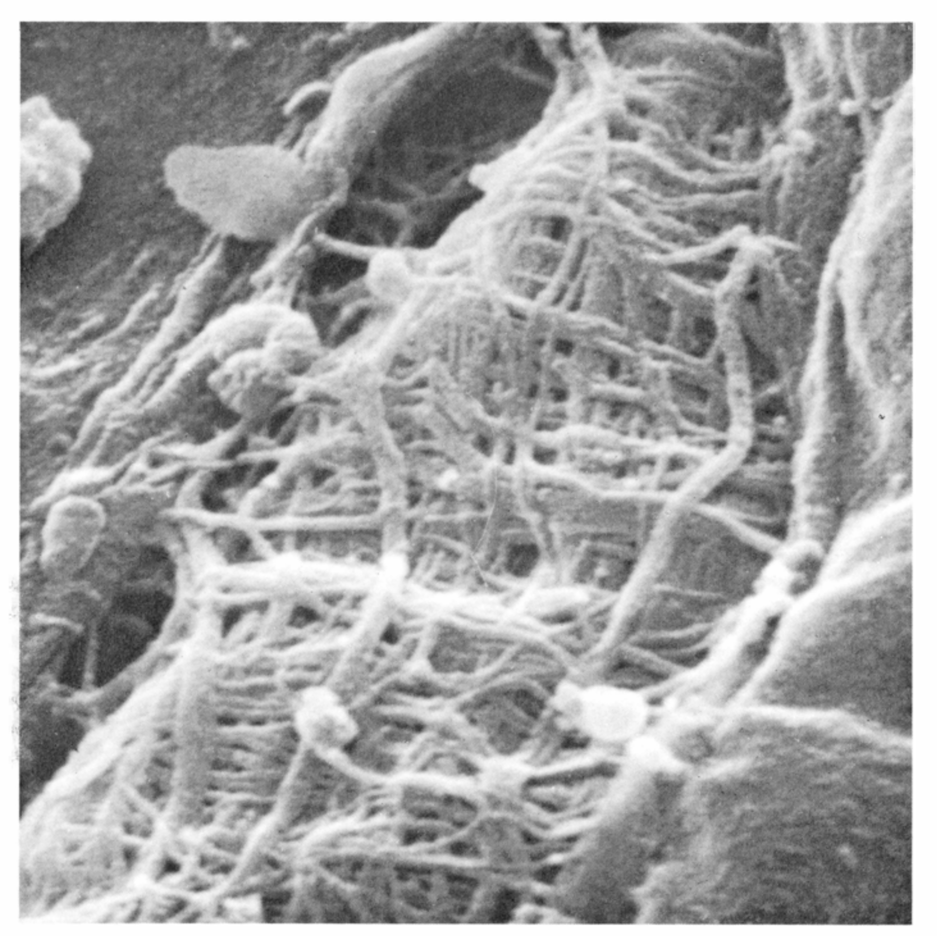
Sospechamos que la formación de enlaces cruzados entre derivados de glucosa y proteínas de vida larga ayuda a explicar muchos de los síntomas del envejecimiento y muchas de las complicaciones de la diabetes, pero tales uniones no son las únicas que pueden dañar al organismo. Hemos demostrado que los AGE dispuestos sobre el colágeno de las paredes arteriales y en las membranas basales de los capilares pueden, de hecho, capturar gran variedad de proteínas plasmáticas que, en circunstancias normales, son de vida breve. Aun cuando se incube primero el colágeno con glucosa y luego se lave en su totalidad el azúcar libre, las proteínas de vida larga conservan la capacidad de unirse covalentemente a ciertas moléculas: albúmina, inmunoglobulinas y lipoproteínas de baja densidad.

Esas uniones quizás expliquen por qué tanto los ancianos como los diabéticos están predispuestos al desarrollo de aterosclerosis: la aparición, en las paredes arteriales, de una placa de células de músculo liso, colágeno (procedente de las células de la musculatura lisa) y lipoproteínas (las proteínas ricas en colesterol que constituyen la fuente principal de grasa y colesterol de las lesiones ateroscleróticas).

No se conocen aún los procesos exactos que instan el desarrollo de la aterosclerosis. Resulta concebible que la glucosa contribuya a la formación de la placa fomentando la acumulación progresiva de productos finales de glicosilación avanzada sobre el colágeno de las paredes del vaso. Formadas esas sustancias, el colágeno atraparía las lipoproteínas de baja densidad que circulan por el plasma, que a su vez pueden constituir sitios de unión para otras lipoproteínas.

Teóricamente, el colágeno modificado por la glucosa podría atrapar también el factor de Von Willebrand, una proteína cuya función consiste, según se cree, en promover la agregación de las plaquetas (cuerpos pegajosos que participan en la coagulación de la sangre). Las plaquetas liberarían un factor que estimula la proliferación de células de la musculatura lisa, que añadirían más colágeno. Otros procesos en los que intervenga la glucosa estimularían la formación de la placa [*véase la figura 5*]. Deberán efectuarse más estudios para determinar la distinta participación de los mecanismos citados y para evaluar su posible interacción con otros procesos que contribuyen al desarrollo de la aterosclerosis.

La captura y entrecruzamiento de proteínas explicaría también las agregaciones que se observan en las membranas basales de los capilares de personas ancianas (y el espesamiento más rápido en los diabéticos). En éstos, el engrosamiento de una membrana basal especializada del riñón, la matriz mesangial, provoca la insuficiencia renal. Menos conocidas son las consecuencias del espesamiento de la membrana basal renal en personas no diabéticas, aunque sospechamos que el proceso pueda contribuir a amortiguar, en los riñones envejecidos, la capacidad de filtrar los desechos de la sangre. Por otra parte, con el paso del tiempo los capilares endurecidos del organismo se estrechan sobremanera o se ocluyen en las extremidades inferiores, donde la gravedad aumenta el ritmo de captura de proteí-



4. FIBRAS de colágeno, la proteína más abundante en el reino animal, ampliadas 26.000 aumentos en esta micrografía electrónica de barrido de colágeno de embrión de pollo tomada por Christine McBride y David E. Birk, de la Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Piscataway. A medida que los animales y las personas envejecen, el entrecruzamiento de las moléculas de proteína de esas fibras provoca el endurecimiento de los tejidos del organismo entero. Aunque no se conoce la naturaleza exacta de todos los entrecruzamientos, los datos hoy disponibles señalan que muchos de ellos podrían ser derivados AGE.

nas por las paredes de los vasos. Ello contribuye al empeoramiento de la circulación y pérdida de sensibilidad en los pies y brazos de los diabéticos y ancianos no diabéticos. Para un funcionamiento adecuado, los nervios sensoriales necesitan un aporte adecuado de sangre.

Puesto que el envejecimiento se registra tanto en el nivel de la célula como en el del tejido, hemos acometido recientemente en nuestro laboratorio el examen de los efectos de la glucosa sobre el material que controla la actividad celular: los genes. El ácido nucleico ADN, que contiene grupos amino, constituye, al menos en las células en reposo, una molécula de vida larga; por consiguiente, podría acumular, en principio, productos finales de glicosilación avanzada. Esos AGE contribuirían al demostrado incremento, con la edad, de las alteraciones cromosómicas y al deterioro correlacionado de la reparación, replicación y transcripción del ADN. Según parece, esos cambios genéticos merman la capacidad del organismo para renovar proteínas de importancia decisiva en el normal funcionamiento y supervivencia de la célula. La glicosilación no enzimática podría también causar mutaciones que afectasen a la actividad del sistema inmunitario u originar algún tipo de cáncer.

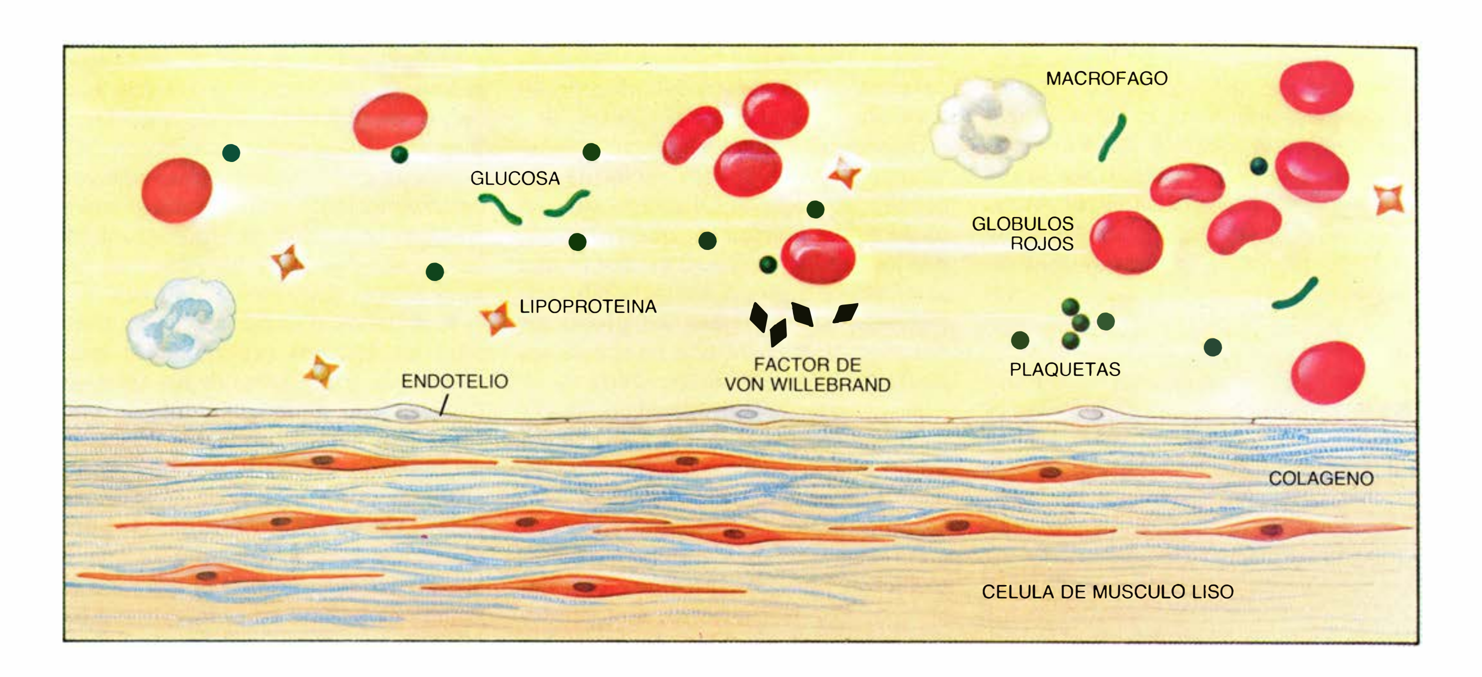
Richard Bucala, Peter Model y Cerami se dieron cuenta de que, incubando ADN con glucosa, ésta daba lugar, inequívocamente, a la formación de compuestos coloreados fluorescentes. La coloración no se produce con la rapidez descrita en las proteínas, porque los grupos amino de los ácidos nucleicos son significativamente menos reactivos que los grupos amino de las proteínas.

Nadie ha investigado todavía el efecto de los AGE sobre los ácidos nucleicos de las células de mamífero, pero los estudios llevados a cabo por el grupo en bacterias sugieren que la glicosilación no enzimática podría entorpecer el normal funcionamiento de los genes humanos. Al incubar en glucosa un bacteriófago (un virus bacteriano) de genoma de ADN e introducirlo en la bacteria *Escherichia coli*, disminuía la capacidad de los fagos para infectar las células de *E. coli*. El grado de disminución dependía del tiempo de incubación, así como de la concentración del azúcar.

Bucala y sus colaboradores encontraron asimismo que, añadiendo el aminoácido lisina a la mezcla de ADN y glucosa, se aceleraba la pérdida de la actividad vírica. Presumiblemente, el azúcar reaccionaba con el aminoácido, formándose un "AGE-lisina" que se unía inmediatamente al ADN. Puesto que las células de mamífero contienen proteína y glucosa, parece probable que la unión covalente de proteínas al ADN que se advierte en las células envejecidas responda a una reacción similar. Se desconoce qué efectos derivan de esa unión de proteínas con el material genético.

No se sabe todavía por qué la unión al ADN de la glucosa, o de una proteína glicosilada, obstaculiza la actividad normal de los bacteriófagos, si bien en otro estudio se demostró que la glucosa provocaba una mutación del ADN. Los investigadores aislaron plásmidos (fragmentos extracromosómicos de ADN bacteriano) portadores de genes que conferían a *E. coli* resistencia contra los antibióticos ampicilina y tetraciclina. Seguidamente incubaron los plásmidos en glucosa-6-fosfato, un azúcar que reacciona antes que la glucosa, introdujeron el ADN en células bacterianas y expusieron las células a un antibiótico. Murió la mayoría de las células expuestas a la tetraciclina, mientras que la mayor parte de las expuestas a la ampicilina sobrevivió. Evidentemente, algunos de los plásmidos incubados portaban el gen de resistencia a la ampicilina, pero habían perdido la actividad del gen de resistencia a la tetraciclina.

Estudios adicionales evidenciaron que la mayoría de los genes de resistencia a la tetraciclina habían sufrido pérdidas o inserciones de ADN. Sospechamos que los genes afectados habían capturado agregados de productos finales de glicosilación avanzada y que las mutaciones derivaban del intento, por parte de las bacterias, de reparar el ADN modificado por los AGE. Tal conclusión se apoyaba también en la observación de que el ADN de las bacterias que carecían de la enzima reparadora de ADN no mutaba.



5. PRODUCTOS FINALES DE LA GLICOSILACION que, según se sospecha, participan a través de varios mecanismos en la génesis de la aterosclerosis y, por tanto, de la enfermedad coronaria, a la que están predispuestos diabéticos y ancianos. Cuando se daña la pared interna de un vaso sanguíneo sano (*arriba*), las proteínas del plasma se pegan a la pared arterial (*abajo*). Los AGE del colágeno de la pared atrapan lipoproteínas de baja densidad (LDL), que se acumulan y forman depósitos de colesterol en las placas ateroscleróticas. Los macrófagos intentan extraer esas lipoproteínas, liberando en el proceso un factor que estimula la proliferación de células de músculo liso y su síntesis de más colágeno (*azul*). Finalmente, los AGE del colágeno podrían capturar el factor de Von Willebrand, que provoca la adhesión de las plaquetas a la pared del vaso. Igual que los macrófagos, las plaquetas liberan un factor de proliferación celular.

A fin de determinar mejor los efectos de los productos finales de glicosilación avanzada sobre el ADN de células humanas estamos desarrollando métodos nuevos para medir los AGE y las proteínas glicosiladas en el ADN. Necesitamos, además, profundizar en el conocimiento de los mecanismos celulares de reparación de los ácidos nucleicos glicosilados.

El objetivo final de nuestro trabajo sobre envejecimiento y diabetes es encontrar el medio de prevenir o retrasar sus efectos debilitadores. Si nuestra hipótesis de glicosilación es correcta, tales efectos podrían mitigarse evitando la formación de uniones de entrecruzamiento derivadas de la glucosa o bien aumentando la actividad de los procesos que eliminan los AGE.

Para afrontar el primer punto hemos desarrollado en nuestro laboratorio, en colaboración con Peter C. Ulrich, una prometedora droga llamada aminoguanidina. Se trata de una molécula pequeña, del grupo de los compuestos conocidos por hidrazinas, que reacciona con los productos Amadori. Por lo que se ve, se une a los grupos carbonilo, impidiendo con ello que los productos Amadori se transformen en productos finales de glicosilación avanzada.

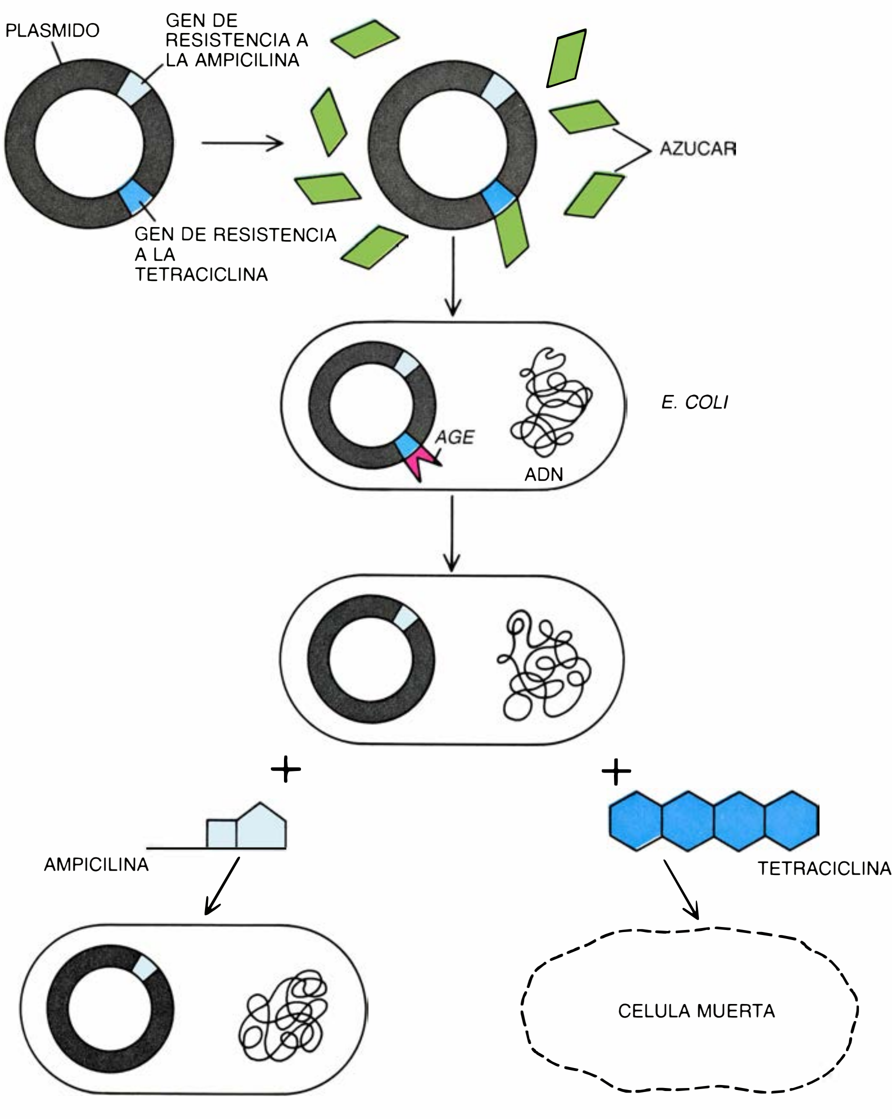
En ensayos de la droga efectuados *in vitro* incubamos albúmina con glucosa sola o bien con glucosa y aminoguanidina. Los productos finales de glicosilación avanzada se formaron en la primera mezcla en media semana e incrementaron progresivamente con el tiempo. Por el contrario, aun produciéndose igual cantidad de productos Amadori, en la mezcla de aminoguanidina se apreciaba una notable inhibición de la formación de AGE. De la misma forma, cuando incubamos colágeno con glucosa, la proteína aparecía extremadamente entrecruzada, mientras que la adición de aminoguanidina bloqueaba casi todos los puentes intermoleculares derivados de glucosa.

Resultados parecidos se han obtenido en estudios realizados en ratas diabéticas. En la aorta de los animales tratados con aminoguanidina se concentraban menos productos finales de glicosilación avanzada y menos entrecruzamientos que en la de ratas no tratadas. En un grupo distinto de ratas diabéticas hemos demostrado que la aminoguanidina impide el acúmulo de inmunoglobulinas en la membrana basal de los capilares renales y, el de lipoproteínas, en la pared arterial.

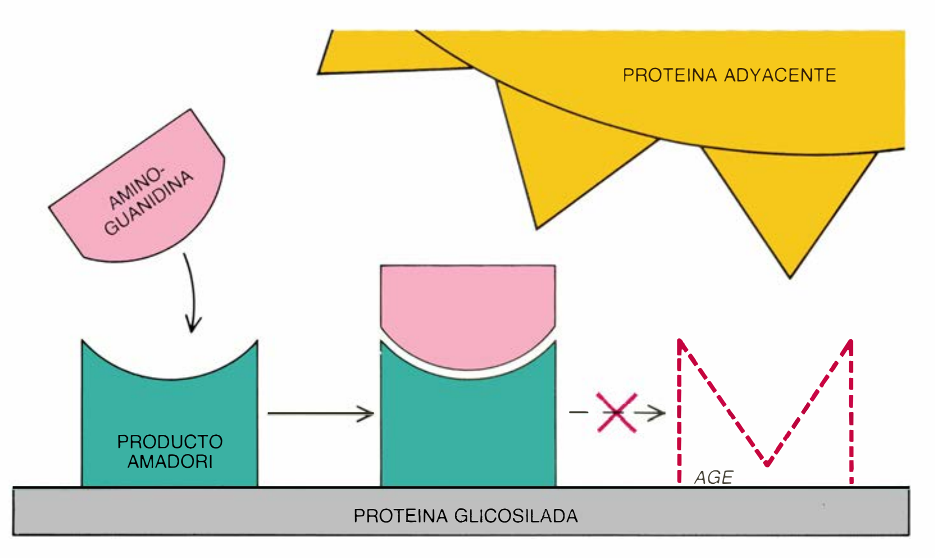
Estamos ahora proyectando ensayos de la aminoguanidina en humanos. Si la droga resulta inocua, esperamos llevar a cabo pruebas a largo plazo de su capacidad para prevenir las complicaciones diabéticas. Puesto que la diabetes constituye, en ciertos aspectos, un modelo de envejecimiento, el éxito de esos experimentos podría, en última instancia, facilitar el estudio de las propiedades de la aminoguanidina (o de compuestos parecidos) para prevenir enfermedades relacionadas con la edad en sujetos no diabéticos.

También estamos analizando el otro enfoque del tratamiento: incrementar la actividad de los sistemas de extracción de los AGE del organismo. Aun cuando no pudiera impedirse la formación de los productos finales de glicosilación avanzada, cualquier sistema que resultara eficaz en la extracción de AGE ayudaría a contrarrestar el desarrollo de estructuras peligrosas a expensas de las proteínas. Los macrófagos, las células "carroñeras" que extraen desechos de los tejidos, constituyen, según parece, uno de esos sistemas de eliminación.

Hace unos tres años se advirtió ya esa propiedad de las células carroñeras cuando examinamos la mielina de los nervios periféricos: mezcla compleja de proteínas de vida larga que forman la vaina de aislamiento que rodea las fibras nerviosas. Para simular los efectos de una exposición prolongada a la glucosa en el organismo, incubamos mielina aislada en glucosa durante ocho semanas. A continuación añadimos macrófagos a la mezcla. En esas condiciones, las células ingerían más mielina que cuando la sustancia no



6. LOS PLASMIDOS, anillos extracromosómicos de ADN bacteriano, mutan al incubarlos con azúcar, señal de que la glucosa podría participar en alguna de las alteraciones observadas en el envejecimiento. Después de la incubación, se insertaron en *E. coli* plásmidos dotados de genes que conferían a la bacteria resistencia frente a los antibióticos ampicilina y tetraciclina. En presencia de ampicilina las células se reproducían normalmente, mientras que ante la tetraciclina la mayoría de las células murió. Al parecer, las enzimas bacterianas intentaban reparar los genes de resistencia a la tetraciclina que acumulaban AGE.



7. AMINOGUANIDINA, una droga experimental desarrollada en el laboratorio de los autores y que interfiere en la capacidad de los productos Amadori para sufrir los cambios que, en circunstancias normales, provocan el establecimiento de enlaces entrecruzados. Se estudia su eficacia y seguridad en humanos.

se había expuesto al azúcar. También eliminaban más mielina de los animales diabéticos que de los no diabéticos, por la probable razón de que aquéllos portan gran cantidad de productos finales de glicosilación avanzada.

Pruebas más recientes indican que la señal que informa a los macrófagos sobre la captación de proteína es, específicamente, los productos finales de glicosilación avanzada. Por ejemplo, hemos encontrado que el macrófago de ratón porta 150.000 receptores para los AGE que se forman sobre la albúmina. Los macrófagos intentan ingerir toda proteína que aparezca unida a productos finales de glicosilación avanzada, FFI, pero los receptores de las células no reaccionan con ninguna de las sustancias distintas de AGE que se acumulan sobre las proteínas, incluidos los productos Amadori.

Afloró espectacularmente la afinidad de los macrófagos por los FFI, y por los productos finales de glicosilación avanzada en general, cuando unimos FFI y otros AGE con las proteínas de membrana de glóbulos rojos normales. Los macrófagos de ratón captaron con más avidez las células alteradas que las normales. (Además de apoyar el argumento de que los macrófagos constituyen un sistema extractor de AGE, tal hallazgo sugiere que los productos finales de glicosilación avanzada desempeñan al menos un papel constructivo en el organismo: quizá señalen que una célula ha envejecido y tiene que eliminarse.)

¿Por qué se acumulan los AGE sobre las proteínas si el organismo dispone de un sistema para deshacerse de ellos? Carecemos de respuesta, pero resultan verosímiles algunas explicaciones. Por un lado, los productos finales suelen formarse en lugares de difícil acceso para los macrófagos. Por otro, parece cada vez más difícil la extracción de las proteínas altamente entrecruzadas que se acumulan en último término. Además, con la edad, el mecanismo de limpieza de desechos que constituyen los macrófagos parece ir perdiendo eficacia. En apoyo de esta última idea hemos descubierto muy recientemente que el número de receptores de AGE de que disponen los macrófagos de ratón disminuye a medida que envejecen.

Nos preocupa hoy hallar drogas que aumenten el ritmo de extracción de esos indeseables productos de glicosilación avanzada, pero el tratamiento adecuado tendrá que disolver los productos finales sin dañar excesivamente las proteínas, irremplazables. En el caso de la mielina, una estimulación exagerada de la captación de AGE en proteínas envejecidas o dañadas podría desgastar la vaina de mielina, esencial para el funcionamiento nervioso.

Debemos contar con más pruebas antes de poder afirmar con certeza que la glicosilación no enzimática de proteínas contribuye a las alteraciones hísticas y celulares que caracterizan al envejecimiento. Los datos aportados indican que nuestra hipótesis es prometedora. Y más importante aún, nuestros hallazgos afianzan la atractiva posibilidad de que algún día se desarrollen tratamientos para prevenir alguno de los cambios que tan a menudo convierten el "envejecimiento" en sinónimo de "enfermedad".

La reaparición de fases

La materia se ordena a medida que se enfría. Sin embargo, algunos sistemas parecen desordenarse de nuevo cuando la temperatura sigue descendiendo. La razón estriba en la interrelación existente entre la energía y la entropía

James S. Walker y Chester A. Vause

Cuando una copa de agua se coloca en un congelador, el agua se solidifica y se produce hielo. Cuando se enfría una barra de hierro incandescente, puede polarizarse magnéticamente. Cuando ciertos metales, tales como el aluminio, se enfrían a temperaturas extremadamente bajas, se convierten en superconductores, perdiendo toda resistencia al flujo de una corriente eléctrica. Cuando se enfrían ciertas mezclas homogéneas de líquidos, se tornan inmiscibles, formándose dos líquidos diferentes separados por una superficie conocida con el nombre de menisco.

Todos estos fenómenos son otros tantos ejemplos de las denominadas transiciones de fase. Se dice que una muestra de materia está en una cierta fase (recuérdese la fase sólida o la fase superconductora) cuando posee un conjunto bien definido de propiedades macroscópicas observables (tales como la dureza o la falta de resistividad). La fase de una muestra de materia constituye, en realidad, una indicación del grado de orden o desorden que caracteriza a las moléculas o a los átomos que constituyen la muestra. Por ejemplo, las moléculas que forman un cristal de hielo están mucho más ordenadas que las de agua líquida. En una barra de hierro imantada, el campo magnético asociado con cada átomo se alinea ordenadamente con los campos de todos los demás, dando lugar así a la creación de un campo magnético intenso; en el hierro no imantado, los campos magnéticos de los átomos se orientan al azar. Dos líquidos separados uno del otro están más ordenados que una mezcla homogénea de esos mismos líquidos.

Cuando se enfría un material, el orden de las moléculas o átomos que lo constituyen aumenta progresivamente. La fase de temperatura alta se vuelve inestable y el material sufre una transición a una fase más ordenada. Por ejemplo, cuando se enfría el vapor de agua, se transforma de fase gaseosa en fase líquida y, más tarde, en fase sólida. Sin embargo, en algunos materiales, la secuencia normal parece invertirse. Cuando estos materiales se enfrían, pasan de una fase a otra, más ordenada, como sería de esperar. Ahora bien, si dichos materiales se siguen enfriando, retornan a la fase inicial. ¡La primera fase reaparece! ¿Cómo se produce esta transformación? Estos procesos parecen violar una condición fundamental de la termodinámica, consistente en el hecho de que los materiales aumentan su orden cuando la temperatura disminuye.

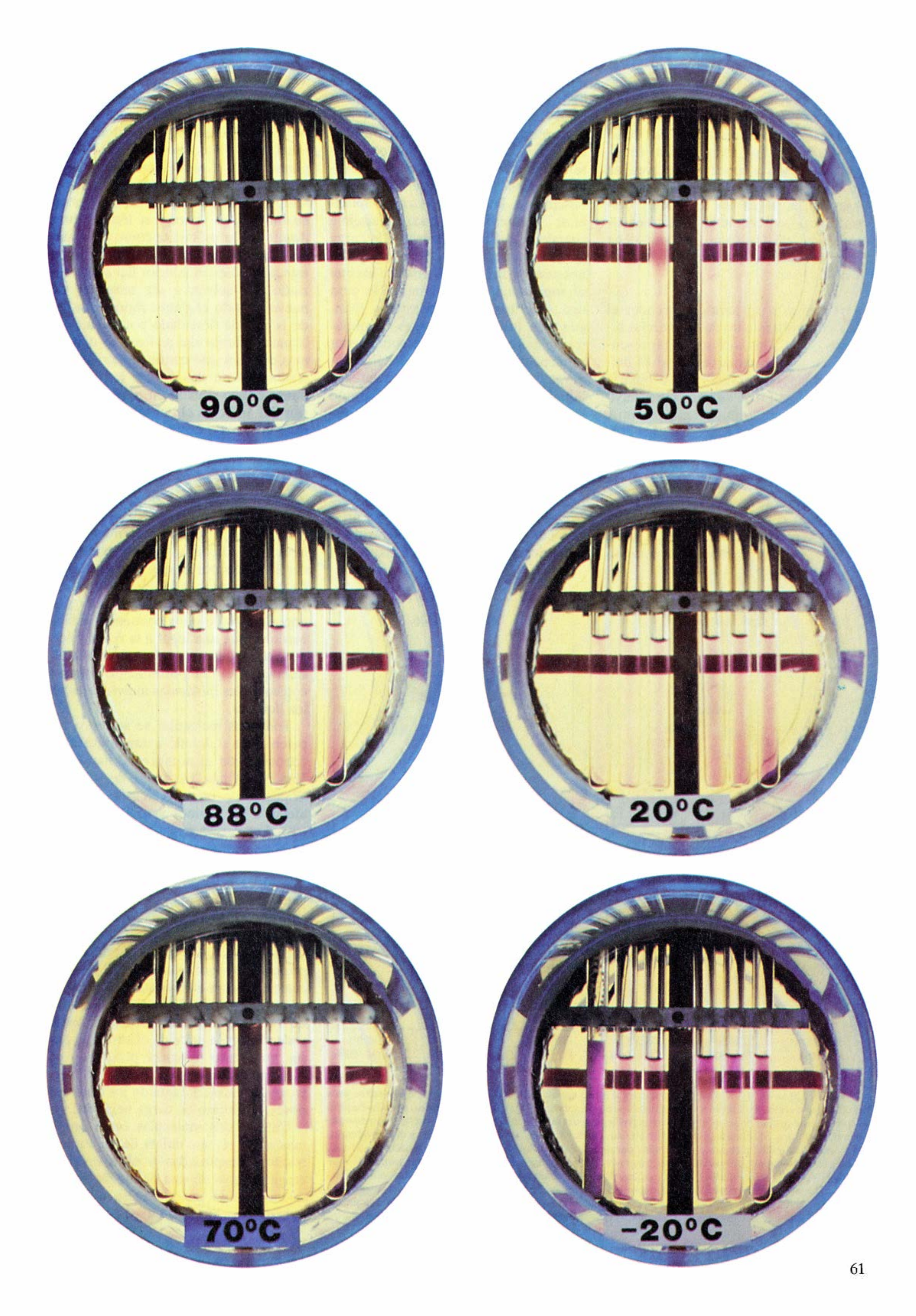
La reaparición de fases es una consecuencia directa de la interrelación entre energía y entropía, o desorden, por un lado, y la asociación de dicha interrelación con los movimientos e interacciones de las moléculas que forman los materiales, por otro. El fenómeno de la reaparición de fases puede revestir gran utilidad en el estudio de los sistemas físicos, pues permite obtener una descripción más detallada y completa de dichas interacciones microscópicas.

Un ejemplo relativamente sencillo del fenómeno de la reaparición de fases se encuentra en los sistemas conocidos como mezclas binarias de líquidos, es decir, mezclas de dos líquidos diferentes. Supongamos que, en una copa, echamos dos líquidos (café y leche o aceite y agua) y removemos a continuación. Si los dos líquidos se mezclan perfectamente (así en el café y la leche) y la copa se llena con un fluido único y homogéneo, se dice que la mezcla constituye una fase miscible. Por el contrario, si los líquidos permanecen separados se dice que son inmiscibles; por ejemplo, cuando se mezclan agua y aceite, aparecen dos líquidos diferenciados (uno de ellos es fundamentalmente aceite y el otro fundamentalmente agua), separados por un menisco. A esta coexistencia de dos líquidos la llamaremos nosotros aquí fase inmiscible.

Ciertas mezclas binarias de líquidos pueden ser miscibles o inmiscibles en razón de la temperatura. La fase inmiscible, en la que las distintas clases de moléculas están separadas en lugares diferentes del recipiente, parece ser la forma más ordenada para ambos líquidos. Cabe esperar, pues, que las mezclas cambien de miscible a inmiscible al disminuir la temperatura. En realidad, esta transformación es la que se observa en la mayoría de las mezclas binarias de líquidos.

Sin embargo, el químico Basil McEwen, del Colegio de su Alteza el Nizam de Hyderabad, en la India, descubrió, en 1923, que no todas las mezclas binarias seguían esta secuencia tan simple. McEwen estudió varias mezclas binarias que eran miscibles a altas temperaturas. De acuerdo con lo esperado, cuando las mezclas se enfriaban, se convertían en inmiscibles. Lo que no se esperaba era que, cuando la tempera-

1. MISCIBILIDAD O INMISCIBILIDAD de dos líquidos: a través de esa propiedad se pone de manifiesto el grado de desorden que existe en las moléculas que los constituyen. La fase inmiscible, o separada, parece estar más ordenada que la fase miscible, u homogénea; en consecuencia, cabría esperar que dicha fase apareciera a bajas temperaturas. Sin embargo, algunas mezclas, tales como las que se representan en esta figura, se separan al disminuir la temperatura y, a continuación, se mezclan de nuevo si la temperatura decrece todavía más, resaltando la existencia de alguna clase de orden oculto en la fase miscible que ha reaparecido. Los tubos de ensayo contienen diversas proporciones de alcohol butílico (*rosa*) y agua. A 90 grados Celsius todas las mezclas son miscibles. Cuando la temperatura ha disminuido hasta 70 grados, todas son inmiscibles. A 20 grados se han mezclado, de nuevo, por completo; en esto consiste la reaparición de la fase miscible. A −20 grados, una de las mezclas (*extremo de la izquierda*) se ha solidificado y tres son miscibles, en tanto que dos de ellas (*extremo de la derecha*) muestran la reaparición de una fase inmiscible. Los tubos que presentan una nube coloreada (las dos centrales a 88 grados y la tercera de la izquierda a 50 grados) están en puntos críticos, donde los dos líquidos que coexisten de la fase inmiscible son idénticos y, por tanto, la fase inmiscible no se puede distinguir de la miscible. El aparato y las fotografías son de Christopher M. Sorensen.

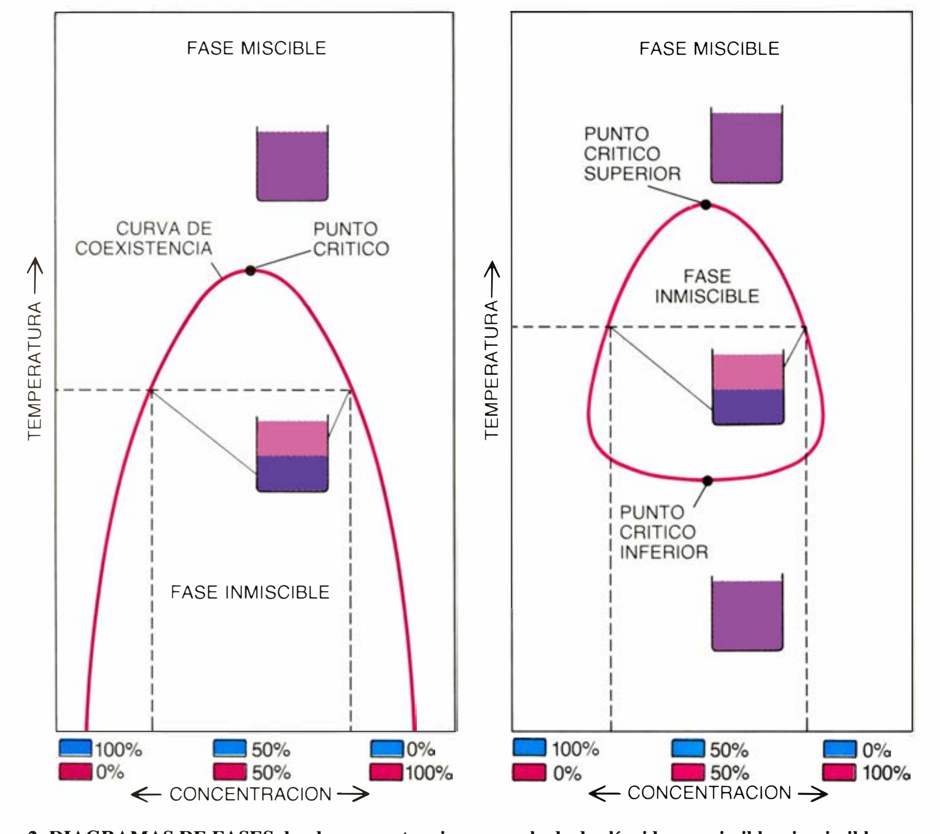

90°C
50°C
88°C
20°C
70°C
-20°C

tura descendía todavía más, algunas de las muestras se hacían miscibles de nuevo y, por tanto, parecían más desordenadas a temperaturas bajas de lo que habían sido a temperaturas intermedias. Desde la época de McEwen, se ha visto que, aunque la reaparición de fases miscibles es un fenómeno bastante raro, se pone de manifiesto en algunas mezclas binarias. ¿Cómo debe interpretarse este fenómeno contradictorio?

El primer paso para comprender el comportamiento de las mezclas binarias de líquidos consiste en representarlo en un diagrama de fases. El diagrama de fases de una mezcla binaria de líquidos consiste en una gráfica cuyo eje vertical representa la temperatura y cuyo eje horizontal representa las proporciones relativas de los dos líquidos que constituyen la mezcla.

La característica fundamental de los diagramas de fases es una curva conocida como curva de coexistencia. Los puntos situados por encima de la curva de coexistencia representan mezclas miscibles; los puntos situados por debajo de dicha curva, mezclas inmiscibles. En consecuencia, cuando baja la temperatura a la que se encuentra una determinada mezcla, el punto representativo de la mezcla en cuestión desciende desde la región de las mezclas miscibles a la de las mezclas inmiscibles: la mezcla se hace inmiscible cuando se enfría. La forma de la curva de coexistencia indica las composiciones exactas de los dos fluidos en los que se separa una mezcla inmiscible para una determinada temperatura. (Ninguno de los dos fluidos es absolutamente puro; ambos están compuestos principalmente por uno de los líquidos puros y una pequeña cantidad del otro líquido.) En esta curva existe un punto especial; se trata del punto para el que los líquidos situados por encima y por debajo del menisco tienen la misma concentración. Se le conoce por punto crítico, y en él las fases miscible y no miscible no se distinguen entre sí.

En los diagramas de fases de las mezclas que presentan el fenómeno de la reaparición, la curva de coexistencia adquiere la forma de una línea cerrada. Los puntos situados a la derecha o a la izquierda de este anillo representan mezclas que nunca se convertirán en inmiscibles, por mucho que descienda la temperatura. Las mezclas con concentraciones intermedias son miscibles a temperaturas elevadas y se convierten en inmiscibles cuando la temperatura disminuye lo suficiente como para que el punto representativo de la mezcla esté situado en el interior del anillo cerrado, y vuelven a ser miscibles de nuevo cuando el punto representativo de la mezcla desciende por debajo de la parte inferior del anillo. Los diagramas de fases que contienen anillos cerrados poseen dos puntos críticos. El punto crítico situado en la parte superior del anillo es el punto crítico superior; el situado en la parte inferior, el punto crítico inferior.

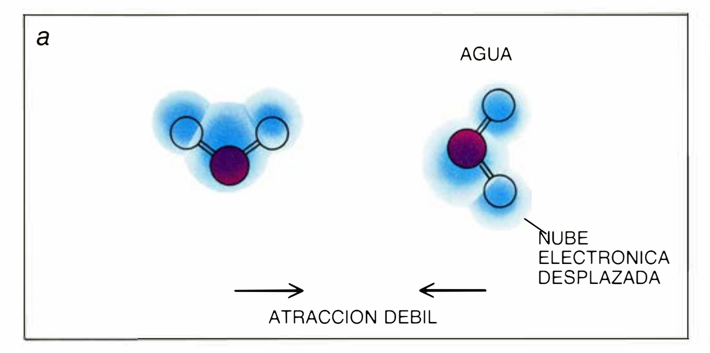


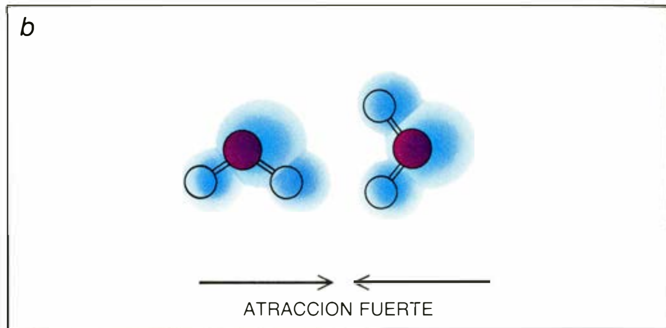
2. DIAGRAMAS DE FASES donde se muestra si una mezcla de dos líquidos es miscible o inmiscible para cierta temperatura. El diagrama de la izquierda se puede aplicar a la mayoría de las mezclas. El eje horizontal representa las proporciones relativas de los ingredientes en la mezcla, mientras que el eje vertical corresponde a la temperatura. Si el punto indicativo de una mezcla está situado por encima de la curva de coexistencia, la mezcla es miscible; si el punto está situado por debajo de dicha curva, inmiscible. La mezcla en cuestión se separa en dos líquidos cuyas concentraciones pueden determinarse representando los puntos para los que la línea correspondiente a la temperatura (*línea horizontal de trazos discontinuos*) corta la línea de coexistencia. Las mezclas que muestran el fenómeno de la reaparición de fases se representan mediante diagramas como el de la derecha, donde la curva de coexistencia forma un anillo cerrado. Cuando la temperatura de una mezcla miscible disminuye, la mezcla se hace primero inmiscible y, más tarde, se torna miscible de nuevo.

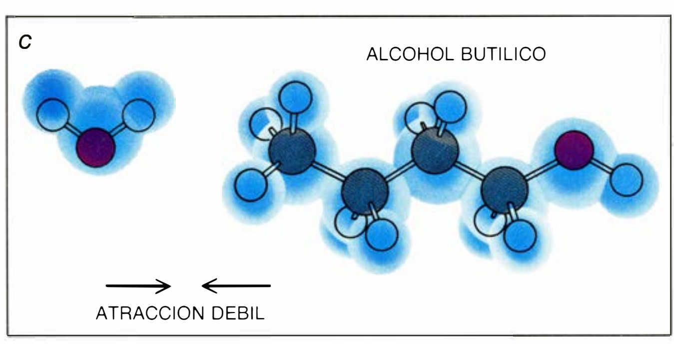
Los diagramas de fases representan el comportamiento de una mezcla a escala macroscópica. En otras palabras, muestran el comportamiento del líquido en su conjunto. Para comprender la razón por la que los diagramas de fases tienen una forma determinada y, en particular, para comprender por qué algunos de ellos contienen anillos cerrados que dan lugar a la reaparición de una fase, es necesario tomar en consideración el comportamiento microscópico de las moléculas individuales de los líquidos.

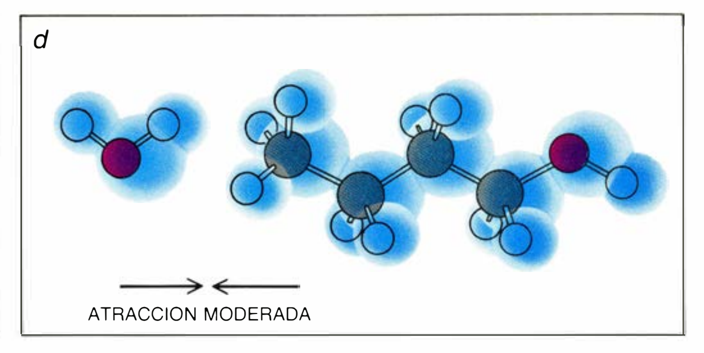
Todas las moléculas se atraen o repelen entre sí debido a una interacción conocida con el nombre de fuerza de Van der Waals. La fuerza de Van der Waals es de origen eléctrico, aunque afecte a los átomos y moléculas neutros. Las cargas negativas que existen en el interior de una molécula están en el interior de una "nube" de electrones que rodea a los núcleos atómicos cargados positivamente que constituyen el corazón de la molécula. La nube de electrones de una molécula puede desplazarse, es decir, puede modificar su posición de forma tal que ya no esté centrada sobre dichos núcleos. En tal caso, una parte de la molécula (la parte de su corazón que no está totalmente rodeada por la nube de electrones) posee un exceso de carga positiva, y la otra parte (la parte de la nube de electrones que está alejada de los núcleos) posee un exceso de carga negativa.

Cuando dos moléculas están próximas entre sí, sus nubes de electrones resultan desplazadas y el exceso de carga positiva de una de las moléculas queda atraído por el exceso de carga negativa de la otra; en consecuencia,









3. FUERZA DE VAN DER WAALS, que atrae entre sí las moléculas. Suele ser más fuerte cuando las moléculas que se atraen son idénticas. Para distancias relativamente grandes (*a*), la nube de electrones de cada molécula puede desplazar su posición respecto a los núcleos que constituyen el corazón de la molécula. En tal caso, las moléculas poseen regiones con un exceso de carga negativa (donde la nube de electrones se ha alejado del corazón de la molécula) y regiones con un exceso de carga positiva (en las que el corazón de la molécula está cerca de los límites de la nube de electrones). El extremo positivamente cargado de una molécula resulta atraído por el extremo negativamente cargado de la otra y las moléculas tienden a unirse. Cuando las moléculas están más próximas (*b*), el desplazamiento de las nubes de electrones es mayor y, por tanto, la atracción es más fuerte. (El desplazamiento no es estático; las posiciones de las nubes de electrones fluctúan cuando las moléculas se agitan.) La intensidad de la fuerza de Van der Waals de largo alcance viene a ser la misma, aunque las moléculas no sean idénticas (*c*). Sin embargo, para distancias pequeñas (*d*), las nubes de las moléculas diferentes no se suelen desplazar tanto como las nubes de las moléculas iguales y, en consecuencia, la fuerza no es tan intensa como la fuerza que atrae a moléculas idénticas próximas entre sí. Desde el punto de vista energético, resulta favorable que las mezclas tiendan a separarse a fin de que las moléculas próximas sean, en general, idénticas. (Ilustraciones de George V. Kelvin.)

las dos moléculas se atraen mutuamente. El desplazamiento de las nubes de electrones no es estático, sino que fluctúa rápidamente mientras las moléculas se mueven y giran al azar. Cuando una molécula se mueve en dirección a otra, las nubes de electrones respectivas se desplazan todavía más, aumentando la intensidad de la fuerza atractiva.

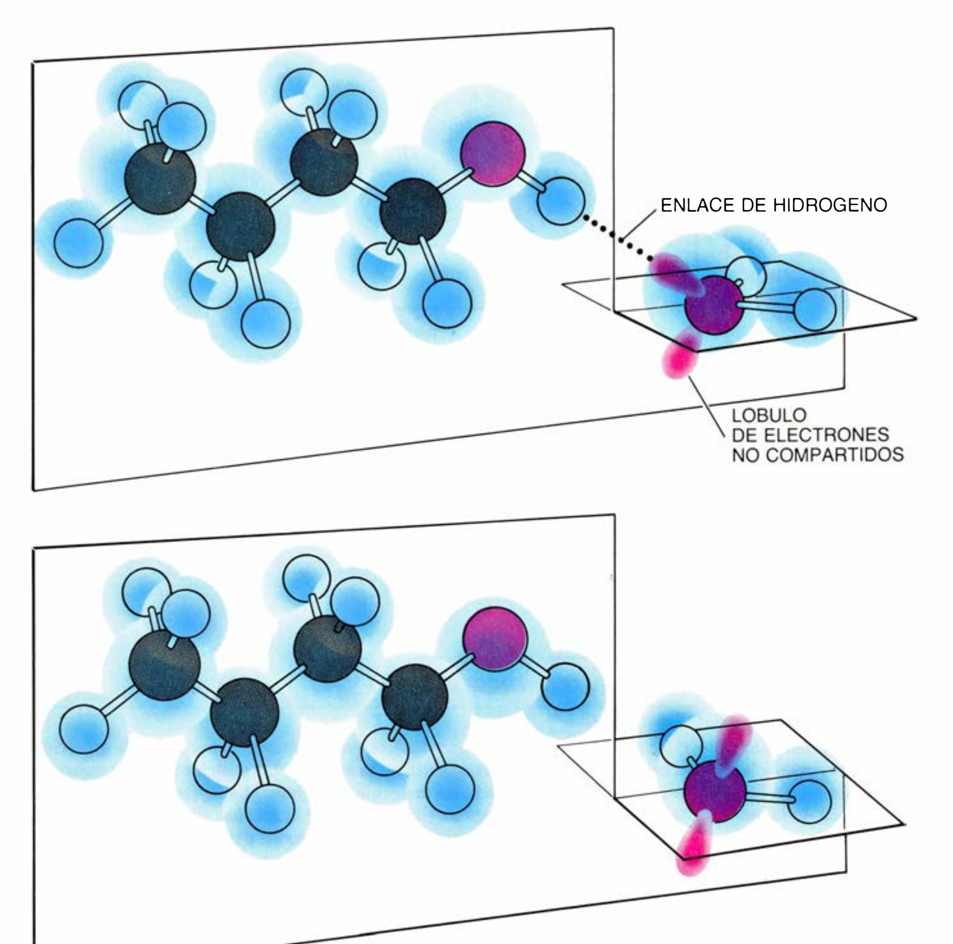
Sin embargo, las moléculas se atraen hasta un cierto límite. Cuando dos moléculas están lo suficientemente próximas como para que sus nubes electrónicas se empiecen a solapar, los electrones de una de ellas repelen a los de la otra y los núcleos de una repelen a los de la otra, con lo cual las moléculas se mantienen separadas.

En general, la intensidad de la interacción de Van der Waals varía según la naturaleza química de las correspondientes moléculas. En la mayoría de los casos, la fuerza atractiva entre moléculas diferentes es mucho más débil que la fuerza atractiva entre moléculas iguales. La energía de un par de moléculas que se mantienen unidas por una fuerza intensa suele ser menor que la de un par de moléculas unidas por una fuerza débil; se necesita una energía mayor para separar a las moléculas más unidas. En muchos casos, la energía de un par de moléculas iguales que están próximas entre sí es mucho menor que la energía de un par de moléculas diferentes que están próximas.

Este hecho experimental hace posible empezar a comprender los diagramas de fases. A consecuencia de la fuerza de Van der Waals, la energía de una mezcla de dos líquidos es mínima cuando la mayoría de las moléculas vecinas de una molécula determinada son de la misma naturaleza que ella. Por tanto, en términos energéticos, la situación más favorable se presenta cuando todas las moléculas de un tipo dado se agrupan entre sí. Evidentemente, ésta es una descripción de la fase inmiscible.

Sin embargo, las consideraciones energéticas no bastan, por sí solas, para comprender el comportamiento de un sistema físico. Por ejemplo, ¿por qué son miscibles las mezclas binarias —aunque sea a temperaturas elevadas— si al mezclar dos líquidos aumenta la energía de la mezcla? La respuesta a esta pregunta hay que buscarla en otro aspecto de la termodinámica, tan importante como la energía: la entropía. En términos simples, la entropía de un sistema físico proporciona una medida del desorden de dicho sistema.

La explicación del hecho de que las mezclas se hagan miscibles a temperaturas elevadas radica en un principio fundamental de la termodinámica: todo sistema tiende a minimizar, no su energía, sino el valor de una magnitud conocida como energía libre. La energía libre de un sistema es igual a la energía de dicho sistema menos el producto de su temperatura por su entropía. Para una temperatura dada, la energía libre se puede rebajar disminuyendo la energía del sistema o aumentando su entropía. Cuando la temperatura de un sistema es baja, el cambio de su entropía afecta muy poco a su energía libre (debido a que la magnitud significativa es el producto de la temperatura por la entropía). En consecuencia, para temperaturas bajas, el agotamiento de la energía libre equivale, prácticamente, a la minimización de la energía. Por el contrario, para temperaturas elevadas, incluso un pequeño cambio en la entropía tiene un efecto importante sobre la energía libre y, por tanto, para temperaturas elevadas, los sistemas tienden a maximizar su entropía.



4. EL ENLACE DE HIDROGENO mantiene unidas a las moléculas en una orientación determinada. En un enlace de hidrógeno (*arriba*), el núcleo de un átomo de hidrógeno de una molécula resulta atraído por un lóbulo de electrones no compartidos de un átomo electronegativo de otra. (El lóbulo es una región donde existen electrones que no participan en los enlaces que mantienen unida a la segunda molécula.) Si las moléculas no están orientadas de forma tal que el hidrógeno pueda alinearse con el lóbulo (*abajo*), no se unirán.

A bajas temperaturas, las mezclas binarias de líquidos se tornan inmiscibles porque cae su energía; a altas temperaturas sí se hacen miscibles en razón del aumento de su entropía. (Una mezcla miscible posee lo que podría denominarse entropía de composición: las dos clases de moléculas están distribuidas al azar.) Todo sistema físico presenta una situación de compromiso entre la energía total más baja y la entropía total más alta. Esta competencia entre energía baja y entropía alta explica la formación y la estabilidad de las diferentes fases de la materia. La energía libre es el árbitro que determina, en última instancia, la naturaleza de la fase de equilibrio.

Los conceptos de energía y entropía permiten describir las propiedades microscópicas de los diagramas de fases ordinarios, en los que las mezclas son miscibles para temperaturas elevadas y no miscibles para temperaturas bajas. ¿Cómo explican estos conceptos el fenómeno de la reaparición de fases? Dado que la influencia de la entropía es menor al disminuir la temperatura, parece fuera de lugar que una mezcla se haga de nuevo miscible, a temperaturas bajas, aumentando su entropía. La misma existencia del fenómeno de la reaparición de fases pone de manifiesto que la imagen microscópica del sistema que hemos descrito anteriormente es incompleta.

¿Qué falta? La respuesta fue sugerida, en 1937, por Joseph O. Hirschfelder, David Stevenson y Henry Eyring, de Princeton; se basa en la existencia de una interacción molecular conocida por enlace de hidrógeno: fuerzas atractivas entre moléculas que, en ocasiones, pueden llegar a ser más fuertes que las fuerzas de Van der Waals, aunque siempre considerablemente más débiles que los enlaces que unen a los átomos para formar las moléculas.

Al contrario que las fuerzas de Van der Waals, que afectan a todas las moléculas, los enlaces de hidrógeno sólo pueden formarse con ciertas clases de moléculas. Estos enlaces surgen cuando el núcleo de un átomo de hidrógeno de una molécula se separa parcialmente de su electrón a causa de la interacción con un átomo electronegativo (por ejemplo, un átomo de oxígeno) que forma parte de la misma molécula. En tal caso, el núcleo de hidrógeno resulta atraído por los electrones de un átomo electronegativo de una molécula próxima. En cierto sentido, los dos átomos electronegativos comparten el mismo núcleo de hidrógeno y las moléculas en cuestión quedan enlazadas.

Al igual que la fuerza atractiva de Van der Waals, el enlace de hidrógeno disminuye la energía del sistema, debido al hecho de que la energía de las moléculas enlazadas es menor que la de las moléculas libres. ¿Qué sucede con la entropía? Supongamos que, en cierta mezcla, sólo pueden formar un enlace de hidrógeno las moléculas que son diferentes. En este caso, el enlace de hidrógeno exigiría que una de las vecinas más próximas de una molécula dada fuera una molécula diferente. Si predominara el enlace de hidrógeno entre moléculas diferentes, la entropía de la mezcla aumentaría y se obtendría una fase miscible. En consecuencia, se podría pensar que el enlace de hidrógeno se produciría a temperaturas elevadas, es decir, cuando la entropía es elevada. De hecho, sucede exactamente lo contrario: el enlace de hidrógeno se produce fundamentalmente a bajas temperaturas. ¿Por qué?

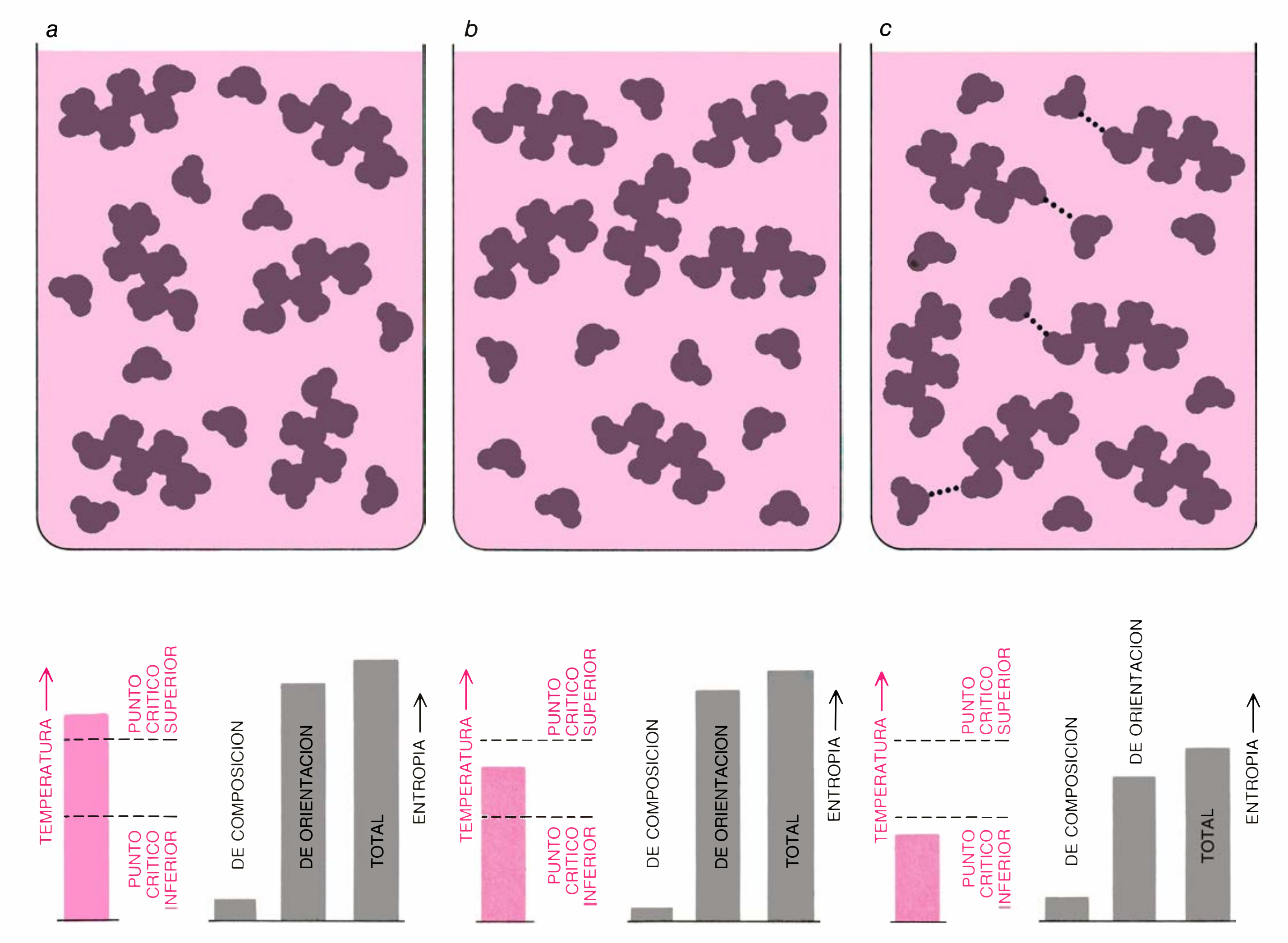
La razón estriba en la existencia de un efecto sutil, mediante el cual el enlace de hidrógeno reduce, en realidad, la entropía de un sistema, en vez de aumentarla. Dos moléculas pueden formar un enlace de hidrógeno únicamente en el caso de que una de ellas posea cierta orientación respecto a la otra, permitiendo que el núcleo de hidrógeno de una molécula se pueda alinear con los electrones del átomo electronegativo de la otra molécula. Habitualmente, la dispersión angular de los enlaces de hidrógeno es tan sólo de 10 grados; en otras palabras, si la orientación relativa de las dos moléculas enlazadas varía en más de 10 grados, el enlace se rompe. Los enlaces de hidrógeno se rompen con facilidad; ahora bien, mientras perduran, mantienen a las moléculas engarzadas en una única orientación relativa. Las moléculas que no poseen enlaces de hidrógeno pue-

den girar libremente sobre sí mismas y tomar cualquier orientación. En consecuencia, estas moléculas poseen una "entropía de orientación" elevada, en tanto que las moléculas con enlaces de hidrógeno poseen una entropía de orientación muy baja.

La entropía de orientación que se pierde al formar un enlace de hidrógeno entre moléculas diferentes es mucho mayor que la entropía de composición que se gana. En consecuencia, el efecto del enlace de hidrógeno entre moléculas diferentes consiste en disminuir la energía total del sistema y, al mismo tiempo, reducir la entropía total (suma de la entropía de composición y la entropía de orientación). Cuando el sistema se encuentra a temperaturas bajas, la disminución de la energía que produce el enlace de hidrógeno tiene un efecto importante sobre la energía libre del sistema, mientras que la disminución de la entropía sólo tiene un efecto pequeño. Por tanto, los enlaces de hidrógeno son termodinámicamente estables a temperaturas bajas. Por otra parte, el papel de la entropía para temperaturas elevadas adquiere mayor importancia; en este caso, la entropía baja de un enlace de hidrógeno tiene un efecto grande y desfavorable sobre la energía libre y los enlaces de hidrógeno tienden a no formarse.

Ahora ya podemos explicar el fenómeno de la reaparición de fases en términos de los procesos microscópicos subyacentes. Para temperaturas altas, la mezcla es miscible y la entropía es elevada. Las moléculas componentes se mezclan al azar (lo que confiere a la mezcla una entropía de composición alta) y están orientadas al azar (lo que confiere a la mezcla una entropía de orientación alta). Cuando la temperatura disminuye, la importancia de la energía aumenta. La disminución de energía asociada con la atracción de Van der Waals acaba por tener un efecto más importante sobre la energía libre que la entropía de composición. En consecuencia, la mezcla se hace inmiscible: las moléculas tienden a disminuir la energía agrupándose con otras moléculas iguales a ellas, en lugar de elevar la entropía al mezclarse con moléculas diferentes.

Si la temperatura de la mezcla sigue disminuyendo en la fase inmiscible, surge otro efecto combinado entre la energía y la entropía. En este caso, se trata de una interrelación entre la entropía de orientación de la fase inmiscible y la disminución de energía que produce el enlace de hidrógeno. La



5. ENTROPIA de una mezcla. Dicho desorden disminuye cuando la temperatura desciende, incluso en el caso de que la mezcla tenga una fase miscible que reaparezca. Para temperaturas altas (*a*), las moléculas están totalmente mezcladas, lo cual da como resultado cierta "entropía de composición". Estas moléculas están también mutuamente orientadas al azar, lo cual conduce a una "entropía de orientación" elevada. Para temperaturas intermedias (*b*), la mezcla es inmiscible y las moléculas componentes se separan; en consecuencia, la entropía de composición disminuye. Para temperaturas bajas (*c*), muchas moléculas diferentes se hallan unidas entre sí por enlaces de hidrógeno en la fase miscible que reaparece. Por tanto, la entropía de composición aumenta, pero la entropía de orientación disminuye considerablemente debido a que las moléculas unidas por enlaces de hidrógeno se mantienen en una orientación relativa única. Incluso en el caso de que las moléculas de la fase que reaparece estén mezcladas, la entropía total resultará menor que en la fase inmiscible.

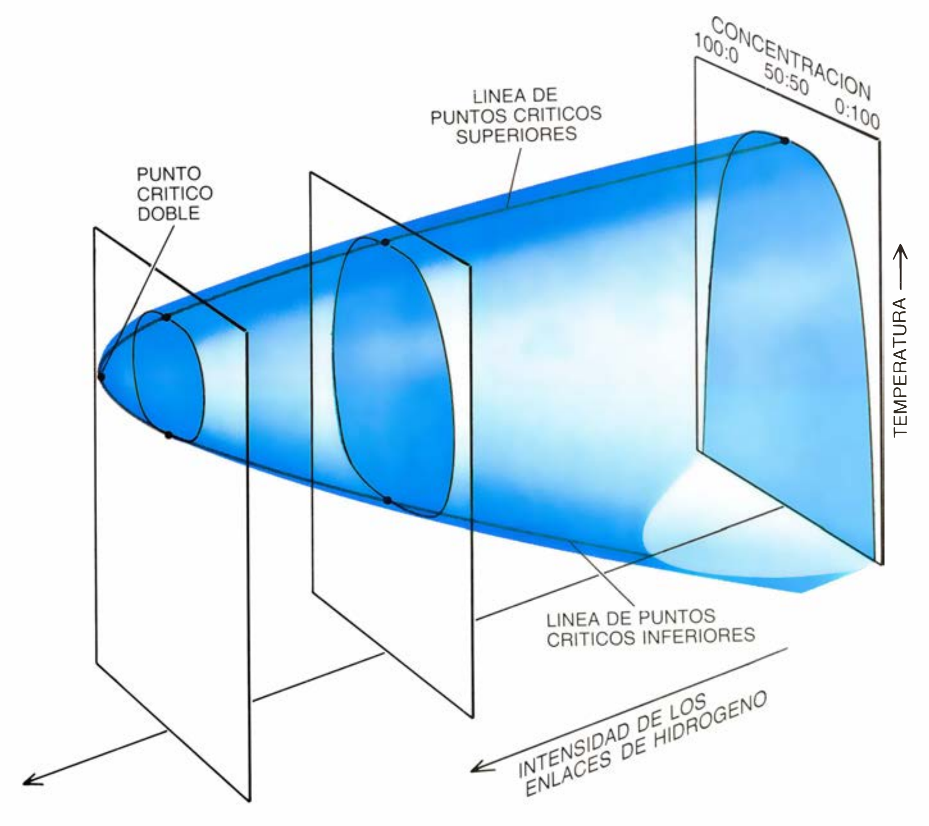
temperatura acaba por caer hasta que la energía pequeña del enlace de hidrógeno adquiere un efecto mayor sobre la energía libre del sistema. A esa temperatura, la mezcla se hace miscible de nuevo. Esta mezcla posee las mismas propiedades macroscópicas que la mezcla miscible de altas temperaturas. La fase miscible ha reaparecido.

¿Para qué intervalo de temperaturas y concentraciones la mezcla permanecerá inmiscible antes de que reaparezca la fase miscible? En otras palabras, ¿cuál es el tamaño del anillo cerrado del diagrama de fase y qué forma tiene? En el curso de nuestro propio trabajo, durante estos últimos años, hemos desarrollado una teoría para determinar la dependencia de los tamaños y formas de los anillos cerrados con las diferentes variables experimentales.

Un parámetro que reviste particular interés es la intensidad del enlace de hidrógeno, o dicho de otro modo, la cantidad en que disminuye la energía de dos moléculas cuando forman parte de un enlace de hidrógeno. Cuando el enlace de hidrógeno es infinitamente débil, es decir, cuando las moléculas de los dos líquidos presentes en la mezcla no forman enlaces de hidrógeno en absoluto, no se producirá la reaparición de la fase miscible. Un ejemplo de este caso lo tenemos en la mezcla de glicerina y de metil-etil-cetona, que se une muy débilmente con enlaces de hidrógeno y que no muestra la reaparición de fase.

¿Qué sucede en los casos en que el enlace de hidrógeno es más fuerte? En los cálculos basados en nuestra teoría, hemos alcanzado un buen acuerdo cuantitativo con los diagramas de fases para tres sistemas experimentales que estaban entre las muestras originales de Basil McEwen. Siguiendo un orden creciente en la intensidad del enlace de hidrógeno, los sistemas son glicerina mezclado con benciletilamina, glicerina mezclada con m-toluidina y glicerina mezclada con guayacol. (En este último sistema, debe añadirse también una pequeña cantidad de agua para debilitar el enlace de hidrógeno entre la glicerina y el guayacol que, de lo contrario, se enlazarían entre sí tan fuertemente que la mezcla nunca se volvería inmiscible.) El anillo cerrado se hace paulatinamente más pequeño a medida que la intensidad del enlace de hidrógeno aumenta. Intuitivamente, esto tiene sentido; cuando más fuerte es el enlace de hidrógeno, más pronto resultará energéticamente eficiente para que la mezcla pierda la entropía de orientación a causa del enlace de hidrógeno.

Estas diferentes mezclas presentan diferencias muy acusadas entre sí. La mezcla de glicerina y metil-etil-cetona no posee en absoluto anillo cerrado, mientras que todas las demás mezclas presentan anillos que difieren considerablemente en tamaños y formas. A pesar de ello, todos estos casos se pueden representar conjuntamente en un solo diagrama de fase tridimensional, conocido con el nombre de diagrama de fase global.



6. ESTE DIAGRAMA DE FASES GLOBAL muestra la forma en que los diagramas de fases de las mezclas binarias de líquidos dependen de la intensidad de los enlaces de hidrógeno que se forman entre moléculas diferentes. Cada "corte" transversal del diagrama de fases global representa el diagrama de fases de una mezcla con una intensidad del enlace de hidrógeno diferente. Cuando los enlaces de hidrógeno son débiles (*extremo derecha*), la mezcla tiene el típico diagrama de fases con forma de cúpula que indica la inexistencia de la reaparición de fase. Cuando los enlaces son más fuertes (*centro e izquierda*), la región que representa la fase inmiscible se cierra para formar un anillo y la mezcla presenta el fenómeno de la reaparición de fase.

Al igual que en los diagramas de fases bidimensionales ordinarios, el eje vertical de un diagrama de fase global representa la temperatura y uno de los ejes horizontales representa la concentración relativa de los dos líquidos de la mezcla. El tercer eje representa la intensidad del enlace de hidrógeno.

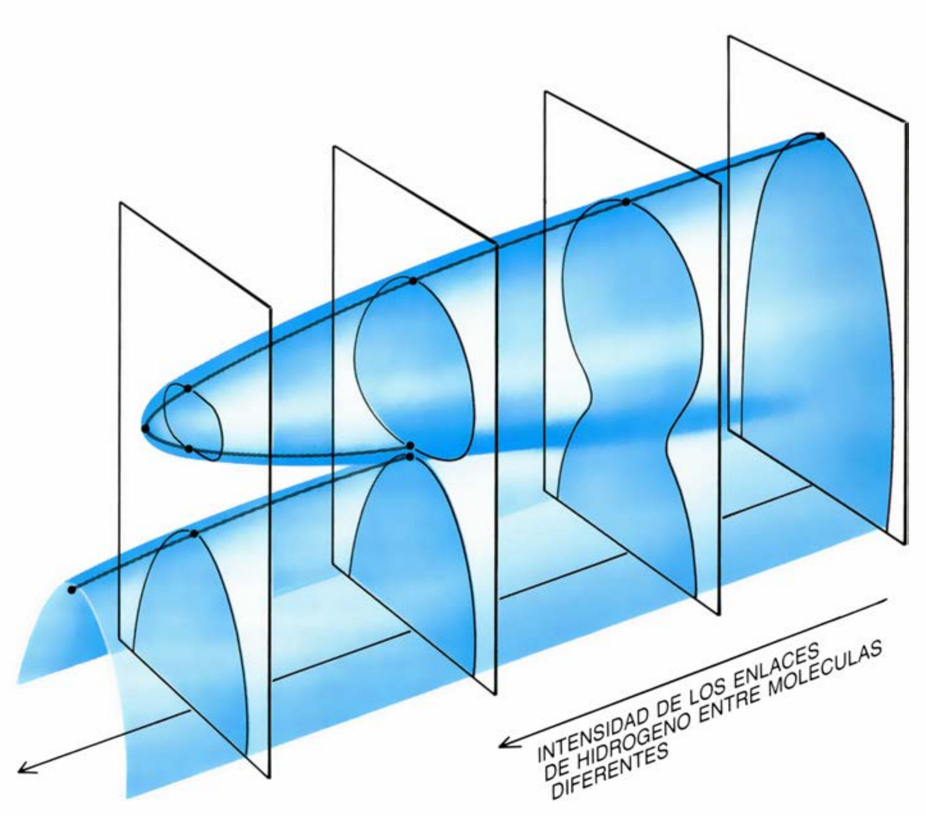
El diagrama de fases tridimensional tiene una forma parecida a la sección de la proa de un avión a reacción. En la región en la que el enlace de hidrógeno es débil, el diagrama semeja una cúpula sin base y representa los sistemas en los que el enlace de hidrógeno es demasiado débil para dar lugar a la reaparición de la fase inmiscible. A medida que aumenta la intensidad del enlace de hidrógeno, la base de la cúpula se cierra, hastar formar un anillo; este anillo se contrae a medida que el enlace se hace más fuerte. Cuando la intensidad del enlace es muy elevada, el anillo de inmiscibilidad se contrae hasta desaparecer por completo; a partir de ese punto, los sistemas son siempre miscibles, cualesquiera que sean las proporciones de los ingredientes. El anillo no sólo cambia de tamaño, sino también de forma, desde una región en la que posee una parte superior curva y una parte inferior plana (para intensidades de enlace bajas) hasta regiones en las que la parte superior e inferior son virtualmente imágenes especulares la una de la otra. Cualquier "corte", o sección transversal, de esta estructura tridimensional es un diagrama de fases que describe el comportamiento de una mezcla en particular.

Con el fin de comprobar este modelo experimentalmente, se provoca un pequeño cambio en la intensidad del en-

lace de un sistema determinado y se observan los cambios que tienen lugar en el diagrama de fases del sistema en cuestión. A continuación, se puede comparar el nuevo diagrama de fases con la sección del diagrama de fases global que corresponda a la nueva intensidad de enlace.

Una forma de cambiar la intensidad del enlace de una mezcla consiste, simplemente, en cambiar uno de los componentes líquidos: pares diferentes de moléculas componentes se enlazan con intensidades diferentes. Una forma más precisa de cambiar la intensidad del enlace, que elimina las complicaciones propias del cambio de naturaleza química de la mezcla, consiste en modificar la presión ejercida sobre el sistema. La mayoría de las experiencias se llevan a cabo a presión atmosférica; pero si, por ejemplo, la presión aumenta, las moléculas se verán forzadas a unirse más estrechamente. Como norma general, la unión entre dos moléculas por enlace de hidrógeno es más fuerte cuando dichas moléculas se encuentran más próximas. En consecuencia, el aumento de presión produce un enlace de hidrógeno más fuerte y da lugar a una contracción del anillo de inmiscibilidad del diagrama de fases. Para presiones suficientemente altas, el anillo desaparece y la mezcla se torna miscible para cualquier temperatura.

Otra forma de alterar la intensidad del enlace consiste en añadir una pequeña cantidad de un tercer componente que sea miscible con la mezcla binaria. (Si sólo se añade una pequeña cantidad de este tercer líquido, la mezcla se comporta todavía, en muchos aspectos, como una mezcla binaria.) Como ya hemos mencionado anteriormente, cuando se añade agua a una mezcla de glicerina y guayacol, la intensidad del enlace disminuye. Esto sucede debido a que una parte del guaiacol se enlaza con el agua, en vez de hacerlo con la glicerina, con lo cual disminuye la interacción de enlace media entre el guayacol y la glicerina y se produce la aparición de la fase inmiscible.



7. LA REAPARICION DE DOS FASES se puede producir cuando las moléculas iguales y las diferentes forman enlaces de hidrógeno, tal como pone de manifiesto este diagrama de fases. En el diagrama, la intensidad de los enlaces de hidrógeno entre moléculas iguales es constante y la intensidad de los enlaces de hidrógeno entre moléculas diferentes varía. Cuando los enlaces de hidrógeno entre moléculas diferentes son débiles (*derecha*), el diagrama de fase de la mezcla tiene la forma habitual de cúpula. Cuando la intensidad de los enlaces aumenta, la región que representa la fase inmiscible se contrae un tanto y, finalmente, se desdobla en dos regiones distintas. En consecuencia, cuando la temperatura de la mezcla disminuye, la mezcla es primero miscible, luego inmiscible, a continuación miscible y, finalmente, inmiscible. En la fase inmiscible que ha reaparecido más baja, las moléculas iguales están unidas entre sí por enlaces de hidrógeno, disminuyendo tanto la entropía de composición como la entropía de orientación. El corte situado más a la izquierda representa el diagrama de fases de las mezclas de alcohol butílico y agua que se representan en la figura 1.

Con este sistema de guayacol, glicerina y agua puede llevarse a cabo una experiencia particularmente interesante. La experiencia en cuestión consiste en cambiar la intensidad del enlace de suerte tal que el anillo de inmiscibilidad llegue a desaparecer. Cuando esto ocurre, los puntos críticos superior e inferior se unen; en otras palabras, la temperatura para la cual la mezcla se hace inmiscible resulta ser exactamente la misma para la que dicha mezcla se hace miscible de nuevo. La unión de los puntos críticos superior e inferior forma lo que se conoce por punto crítico doble.

Una mezcla en un punto crítico doble posee algunas propiedades singulares. Una de tales propiedades se refiere a los exponentes críticos. Estos entes matemáticos indican la velocidad a la que se produce una determinada transición de fase cuando varía un parámetro externo como la temperatura o la presión [véase "Problemas físicos con muchas escalas de longitud", por Kenneth G. Wilson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; octubre de 1979]. El hecho más destacable de los exponentes críticos es que se trata de constantes universales. Por ejemplo, el valor de los exponentes críticos que describen la cuantía en la que una mezcla se hace inmiscible al variar la temperatura en las proximidades del punto crítico es el mismo para todas las mezclas binarias líquidas. Además, los exponentes críticos que describen muchos otros tipos de transiciones de fase son idénticos a los exponentes que describen las transiciones de miscibilidad-inmiscibilidad. Por ejemplo, los mismos valores numéricos de los exponentes críticos que describen la transición de la miscibilidad a la inmiscibilidad dan cuenta también de la forma en que tiene lugar cualquier transición entre la fase líquida y la gaseosa en el punto crítico de esta transición.

En los puntos críticos dobles, los valores de ciertos exponentes críticos son exactamente el doble de sus valores normales. Este resultado fue predicho hace unos 20 años, y fue comprobado, en 1985, por dos grupos experimentales: el de Roger G. Johnston y Noel A. Clark, de la Universidad de Colorado en Boulder, en colaboración con Pierre Wiltzius y David S. Cannell, de la Universidad de California en Santa Bárbara, e independientemente, G.A. Larsen y Christopher M. Sorensen, de la Universidad estatal de Kansas. Estos grupos confirmaron la citada predicción estudiando la dispersión de la luz por parte de ciertas mezclas líquidas cuya intensidad del enlace de hidró-

geno, temperatura y composición eran las adecuadas para producir un punto crítico doble.

Aunque estos experimentos resultan muy interesantes, no agotan todas las posibilidades de la reaparición de fases en las mezclas binarias. Supongamos que dos moléculas iguales pueden unirse por enlace de hidrógeno, de la misma forma en que lo hacen dos moléculas diferentes. (Así, en una mezcla de agua y alcohol butílico, una molécula de agua no sólo puede unirse por enlace de hidrógeno con una molécula de alcohol butílico, sino que lo puede hacer también con otra molécula de agua.) Supongamos, además, que la energía de un par de moléculas iguales enlazadas es menor que la de un par de moléculas diferentes. En este caso habrá dos reapariciones de fase. A temperaturas altas, la mezcla sería miscible. Al descender la temperatura, la mezcla se volvería inmiscible. Si la temperatura disminuyera todavía más, la mezcla sería, de nuevo, miscible, y finalmente, para temperaturas muy bajas, se tornaría, de nuevo, inmiscible. En esta segunda fase inmiscible, las moléculas iguales estarían unidas entre sí por enlaces de hidrógeno y perderían su entropía de composición y orientación a fin de disminuir la energía.

Los datos aportados por la experimentación sugieren que algunas mezclas podrían manipularse para adquirir propiedades todavía más raras. Supongamos que una de las moléculas de la mezcla es capaz de formar dos enlaces de hidrógeno a la vez. En este caso, el diagrama de fases de la mezcla podría tener varios anillos cerrados. Se puede así imaginar una mezcla que poseyera hasta cinco puntos críticos. A medida que la temperatura disminuyera, esta mezcla pasaría de miscible a inmiscible, de nuevo a miscible, a inmiscible, a miscible y, finalmente, a inmiscible.

En este artículo nos hemos ocupado del fenómeno de la reaparición de fases en mezclas binarias de líquidos, el medio en el que este fenómeno se descubrió. Existen también numerosos ejemplos del mismo fenómeno en otros tipos de sistemas. Uno de ellos se encuentra en la superconductividad. Ciertos metales pueden estar en fase normal o en fase superconductora. En la fase normal, se comportan como cualquier otro conductor: ofrecen una resistencia finita al paso de una corriente eléctrica. Sin embargo, cuando la temperatura es muy baja, estos metales pierden de repente toda su resistencia al paso de la electricidad y se vuelven superconductores. La fase superconductora se debe a cierto tipo de orden de largo alcance (conocido por apareamiento de Cooper) entre los electrones del metal. En consecuencia, la fase superconductora está más ordenada que la fase normal que se pone de manifiesto a altas temperaturas. Sin embargo, como descubrieron G.Riblet y K. Winzer, de la Universidad de Colonia, en 1971, cuando ciertos superconductores se enfrían hasta temperaturas todavía más bajas, se convierten de nuevo en normales.

Otra clase de reaparición de fases se encuentra en las monocapas adsorbidas, que son capas sencillas de moléculas formadas sobre la superficie de un sólido. En estos sistemas, las moléculas adsorbidas se pueden mover con relativa libertad a lo largo de la superficie del sólido, pero la existencia de una intensa fuerza atractiva les impide abandonar dicha superficie. Los sistemas adsorbidos se comportan como si fueran bidimensionales, pero poseen fases que son análogas, en muchos sentidos, a los gases, líquidos y sólidos tridimensionales. Cuando el gas noble kriptón se adsorbe en grafito, forma una fase líquida bidimensional a unos 130 grados Kelvin (130 grados Celsius por encima del cero absoluto). Este líquido solidifica y da lugar a un cristal bidimensional cuando se enfría a unos 125 grados Kelvin, y funde de nuevo para formar una fase líquida a unos 120 grados.

Dado que la reaparición de fases es un fenómeno que se produce en una extensa variedad de sistemas, es natural que los mecanismos microscópicos que subyacen sean bastante diferentes. Sin embargo, en todos estos ejemplos se da un rasgo común: los cambios de fase se producen en virtud de la competencia entre energía y entropía; la reaparición de fases pone de manifiesto la existencia de interacciones que disminuyen la entropía en alguna forma "oculta" y, al mismo tiempo, disminuyen la energía del sistema como un todo.

Las mezclas binarias de líquidos constituyen un medio particularmente bueno para estudiar la termodinámica de la reaparición de fases. Las temperaturas necesarias son accesibles y la manipulación de diversos parámetros, a fin de comprobar los métodos y descripciones teóricos, resulta bastante fácil. Estos métodos y descripciones teóricas se pueden aplicar más tarde a otros campos, en los que el estudio experimental del fenómeno de la reaparición de fases es mucho más difícil.

Detonación de explosivos

La detonación se propaga por el explosivo convertida en onda de choque supersónica e impulsada por la energía de las reacciones químicas que la onda induce. No se dispone todavía de una teoría que describa el proceso

William C.Davis

En 1846, el químico italiano Ascanio Sobrero descubrió que la combinación de ácido nítrico y glicerina producía una substancia líquida de propiedades muy peculiares. La substancia explotaba violentamente, y de forma distinta de como lo hacía la pólvora negra, el explosivo común de la época. La pólvora negra no explota, a menos que se la confine y sus gases de combustión generen grandes presiones; basta, en cambio, una pequeña cantidad de ese líquido oleoso para que explote con mayor potencia que la pólvora negra, sin necesidad de confinamiento. Sobrero no sólo había descubierto un nuevo compuesto, la nitroglicerina, sino también un proceso físico enteramente nuevo para la explosión de las substancias: la detonación.

Al difundirse el hallazgo de Sobrero, otros investigadores intentaron aplicarlo. Entre ellos, el incansable inventor sueco Emanuel Nobel, quien trató de añadir, sin éxito, nitroglicerina a la pólvora negra para así aumentar su eficacia. En 1863, su hijo Alfred intuyó que el nuevo tipo de explosivo necesitaba una carga iniciadora distinta. Las cargas de pólvora negra precisan de la llama para estallar; el joven Nobel desarrolló, sin embargo, un detonador que hacía estallar la nitroglicerina "por percusión o por presión brusca", tal como figura en la patente.

Las substancias que explotan con la violencia de la nitroglicerina se clasifican entre los explosivos detonantes o rompedores, para distinguirlos de los explosivos lentos o no detonantes; estos últimos son substancias que, como la pólvora negra, se limitan a arder enérgicamente. Aunque Alfred Nobel y otros investigadores diseñaron un amplio muestrario de explosivos rompedores y fulminantes, se dejaron guiar, en la mayoría de los casos, por su habilidad e intuición más que por un conocimiento profundo de la física y la química de las detonaciones.

La utilización de métodos de tanteo en el desarrollo de los explosivos rompedores prevaleció hasta hace pocas décadas, cuando el estudio de los explosivos se transformó paulatinamente de una ciencia empírica en una ciencia basada en sólidos fundamentos teóricos. Con todo, el cambio no es aún completo, aunque las investigaciones actuales acelerarán probablemente el ritmo de esta transformación. Los progresos en el análisis teórico, secundados por los nuevos métodos computacionales, ayudan a explicar la estructura de las inhomogeneidades que desempeñan, tal parece, un importante papel en la propagación de la detonación por el explosivo. Nuevas técnicas experimentales, así la espectroscopía de láser, aportan los datos fundamentales de las complejas ecuaciones que describen el comportamiento de los materiales sometidos a las condiciones extremas de presión y de temperatura que se dan en la detonación de los explosivos. Estos esfuerzos de investigación habrán de traernos lo que echamos en falta: una teoría general de la detonación.

Ironía de las cosas, a un nuevo tipo de proceso explosivo —la reacción nuclear en cadena— debemos el impulso que ha recibido el estudio teórico de la detonación. Las armas nucleares se fundan en explosivos rompedores para acoplar rápidamente los componentes decisivos de la reacción. Es decir, los procesos de acoplamiento demandan explosivos químicos cuyos efectos de combustión puedan controlarse de modo preciso. Esa condición determinante instó la transformación radical de la industria de explosivos. De la noche a la mañana se hicieron imprescindibles, en el sector de los explosivos, propiedades de una tecnología avanzada: precisión, predicción y dominio de la graduación finamente escalonada.

Por otra parte, los ingenieros empezaron pronto a ver, en los explosivos de precisión, fuentes compactas de energía de enorme potencia que, aunque de corta duración, eran seguras, controlables y, lo mejor de todo, baratas. No se tardó mucho en asignarles múltiples aplicaciones nuevas. Con la oportuna distribución de los explosivos por columnas y vigas que sostienen los edificios viejos, y su detonación en una secuencia precisa, se arrasa la fábrica formando limpias pilas de escombros. En metalurgia los usan para endurecer, dar forma, soldar y chapar hojas o tubos. Hay incluso casos donde la soldadura mediante explosivos constituye el único medio viable de unir metales incompatibles, como el aluminio y el acero.

Ciertos dispositivos recurren a la explosión para forzar la colisión violenta de planchas de metal, produciendo la eyección de un haz de partículas metálicas de alta velocidad entre las mismas. Esos chorros desmenuzan los materiales más duros y se usan para penetrar en blindajes, cortar estructuras de acero y perforar oleoductos. Se emplean "cuchillas" explosivas, basadas en los mismos principios, en la sección instantánea de ciertas estructuras sometidas a gran tensión, como en la separación de misiles o en las fases de un cohete.

Se aplican también las explosiones a la producción de las grandes presiones y temperaturas necesarias para producir diamantes a partir del grafito, para fundir polvos de metales y de materiales cerámicos y para desencadenar reacciones químicas que, sin ellas, no se iniciarían. Quizás la aplicación menos conocida sea su intervención en el desarrollo de compresores de campo magnético; gracias a las explosiones, éstos alcanzan intensidades de hasta 10 millones de veces la intensidad del campo magnético terrestre. Estos campos magnéticos generan enormes pulsos eléctricos.

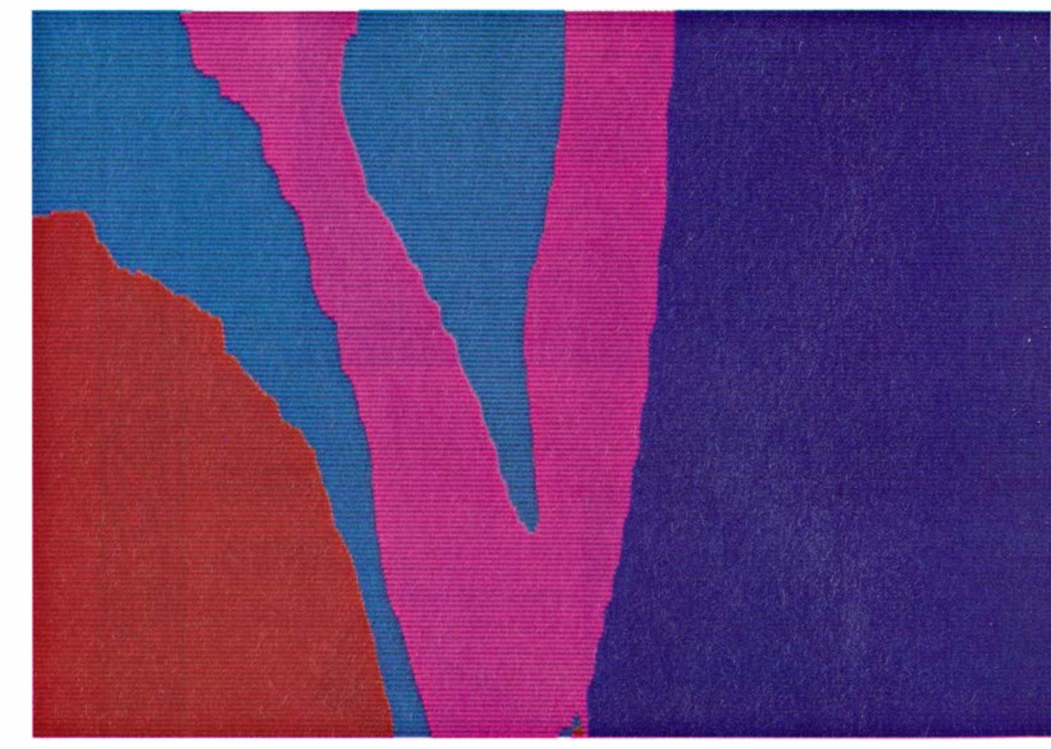
A pesar de la extensa gama de aplicaciones actuales de los explosivos, la ciencia de la detonación no ha alcanzado todavía, por varias razones, la madurez. Está, en primer lugar, la complejidad intrínseca de los cálculos teóricos. Los procesos lineales, que aparecen en muchos campos de la física clásica, no encierran especial dificultad; la detonación constituye, en cambio, un proceso exquisitamente no lineal. Resulta una tarea muy ardua modelizar matemáticamente los procesos no lineales, mucho más que los lineales: no es fácil resolver las ecuaciones, y las pocas soluciones que se obtienen apenas si ofrecen interés práctico.

En segundo lugar, los problemas relativos a la detonación operan en dos escalas dimensionales muy diferentes: la región donde se desarrollan las reacciones químicas críticas, o zona de reacción, es cien o mil veces menor que la región donde los productos de la reacción liberan su energía. Ahora bien, la forma como los productos de la explosión transfieren su energía al material inerte envolvente influye en el desenvolvimiento de las reacciones químicas. El estudio de ambos procesos no debe, pues, separarse.

Tercer motivo: escasea la información acerca de las propiedades físicas y químicas de los materiales sometidos a las temperaturas y presiones altísimas, que se registran durante la explosión. Se desconoce, casi por entero, la relación entre la presión, el volumen y la temperatura de una mezcla química dada (la denominada ecuación de estado de mezcla), y no sabemos cómo reacciona la mezcla para constituir otras mezclas químicas bajo tales condiciones. Sin esos datos, no queda más remedio que levantar teorías ayunas de una descripción de las propiedades reales del material; los defectos inherentes a la teoría deben corregirse ajustando parámetros arbitrarios de acuerdo con los resultados experimentales.

Pero ocurre, además, que los expe-

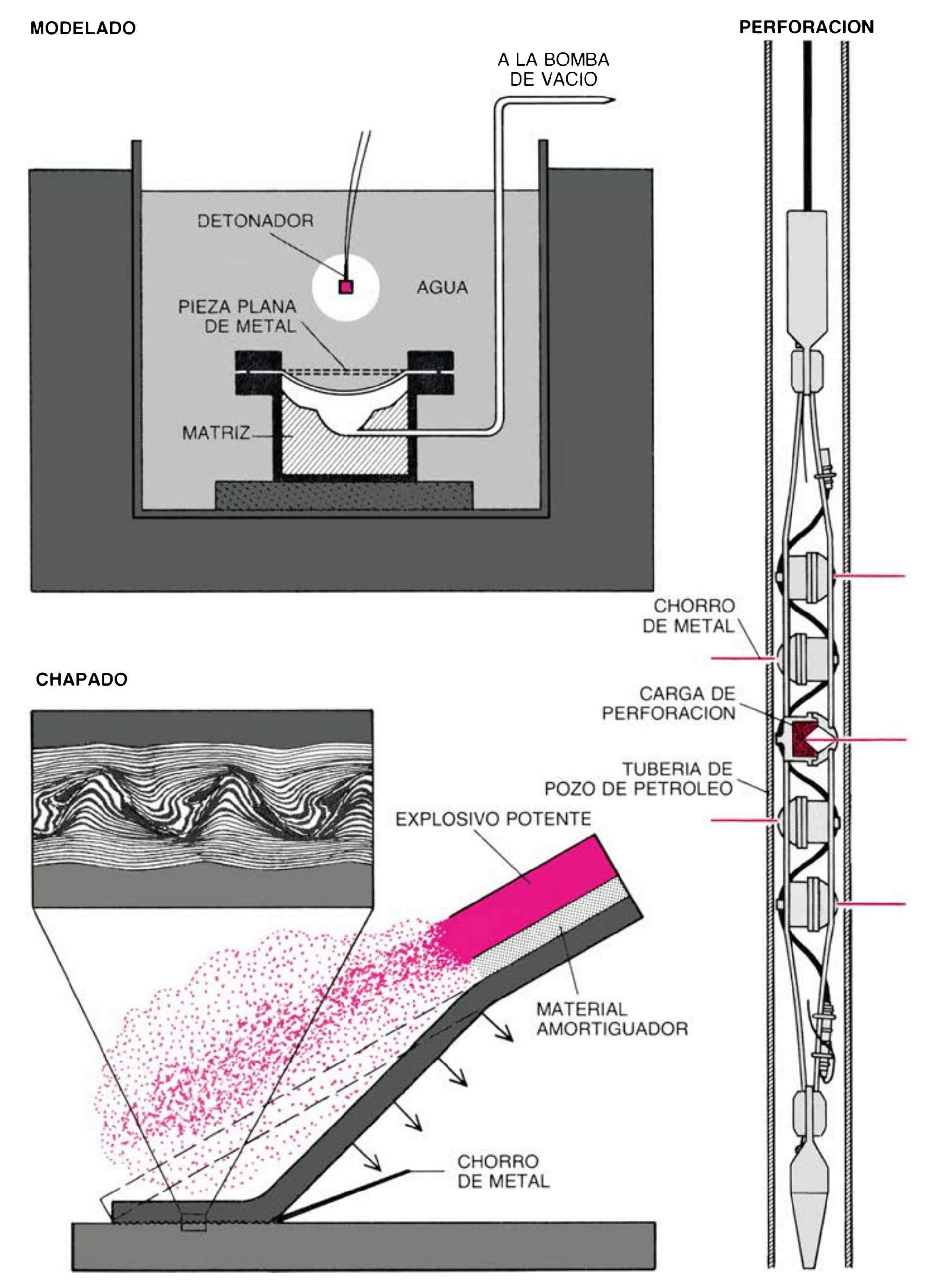






1. AVANCE DE UNA ONDA DETONADORA de izquierda a derecha a través de un gas explosivo encerrado en un tubo. Las creaciones del ordenador definen, mediante colores arbitrarios, las distintas zonas. El azul oscuro representa el gas a baja temperatura sin reaccionar; el azul turquesa y el rojo, gas a alta temperatura que ha reaccionado enteramente; el rosa, temperatura intermedia, para la cual la reacción es parcial. El frente de onda de la detonación —en realidad, una onda de choque— tiene una componente transversal que forma una bolsa de gas de reacción parcial. Las imágenes se han generado en el laboratorio de física computacional del Laboratorio de Investigación Naval de los EE.UU.

rimentos son costosos y delicados en su ejecución. Los componentes del explosivo se destruyen inevitablemente y, para cada medición, hay que tornar a prepararlos con suma laboriosidad. En la mente de todos está que la mayoría de los ensayos no puede realizarse en un recinto cerrado; exigen una amplia zona abierta, lejos de la habitación humana. Para complicarlo todavía más, las condiciones a medir en un explosivo se acercan a los límites de lo mensurable. Las presiones máximas alcanzan, en una explosión, valores de 500.000 veces la presión atmosférica; la detonación se propaga por el explosivo a velocidades de hasta 10 kilómetros por segundo (multiplica por 30 la velocidad del sonido en el aire). La escala de tiempos de las reacciones químicas es del orden de nanosegundos (milmillonésimas de segundo) y tienen lugar en una capa de 0,01 a 1 milímetro de espesor. Hasta hace muy poco carecíamos de instrumentos dotados de la resolución espacial y temporal adecuada. Y no olvidemos que han de operar en medio de una explosión, lo que dificulta su funcionamiento correcto.



2. APLICACIONES ACTUALES de los explosivos detonantes o rompedores. Entre las mismas cabe citar el modelado, chapado y perforación de metales. El modelado mediante explosivos consiste en la detonación en agua con la subsiguiente generación de un potente pulso de presión que fuerza la configuración de la lámina de metal con la forma de la matriz. En el chapado, se alinea una plancha de metal con el explosivo y el material amortiguador creando un ángulo con otra plancha metálica de mayor espesor. El explosivo detona en la juntura de ambas piezas, impulsando la pieza delgada hacia la gruesa con tal fuerza que ambas quedan unidas. Como subproducto del proceso de chapado se genera un chorro de partículas metálicas que pueden utilizarse para cortar los materiales más duros. En el proceso de perforación se aplica el mismo principio, al producirse un chorro perforante mediante el colapso explosivo de un revestimiento metálico cónico.

A nadie debe sorprender, pues, que los primeros pasos significativos dirigidos hacia la elaboración de una teoría de la detonación daten del último cuarto del siglo XIX, con el estudio, no de las explosiones, sino de un fenómeno íntimamente relacionado con las mismas: las ondas de choque. Al establecer las bases de una teoría de la propagación de las ondas de choque, los investigadores del siglo pasado plantearon un modelo muy simple: un fluido que ocupa un largo cilindro cerrado, en uno de sus extremos, por un pistón. Al acelerar de repente el pistón hacia el interior del cilindro, el fluido en contacto con él se moverá con su misma velocidad. Así, al inicio del movimiento del pistón, el plano que separa el fluido en movimiento del fluido estacionario se hallará próximo al pistón. Como el espesor de la capa de fluido en movimiento crece rápidamente a medida que prospera el movimiento del pistón por el cilindro, el plano de separación se aleja con celeridad del pistón. El plano se mueve antes por el cilindro que el pistón (cuya velocidad coincide con la del fluido en movimiento), ya que, por cada unidad de distancia que avance el pistón, el plano ha recorrido la misma distancia más el incremento de espesor, añadido a la capa de fluido en movimiento por el propio avance del pistón.

Este plano en movimiento, que separa el material estacionario del material en movimiento, constituye una onda de choque. A una velocidad del fluido pequeña, la onda de choque es débil y su velocidad viene a confundirse con la de una onda sonora en un fluido estacionario. Pero si la velocidad del fluido adquiere cierto valor, la onda de choque se mueve más deprisa que en el fluido estacionario.

Al avanzar el pistón, el fluido que ocupa el volumen entre él y la onda de choque (el fluido de choque) se comprime y aumenta de presión. Aplicando la ecuación de estado del fluido (que describe la relación que guardan entre sí la presión, la temperatura, el volumen y la composición) y los principios físicos fundamentales de conservación de la masa, de la energía y del momento lineal en la onda de choque,

se demuestra que la presión en el fluido de choque viene determinada por el material que constituye el fluido, así como por su velocidad. Por otro lado, la presión del fluido de choque y la velocidad del material están determinadas por la velocidad de la onda de choque. Es, pues, este último parámetro el que fija el estado del fluido de choque.

Al estudiar los gases explosivos, los científicos advirtieron que la detonación se propagaba ondulatoriamente a través del gas, como si se tratara de una onda de choque; en 1899, el químico inglés David L. Chapman propuso que una onda de detonación que se propagara por un gas explosivo podía considerarse una auténtica onda de choque automantenida. Chapman sostenía que una onda de choque, en su curso por un explosivo rompedor, precipitaba en su estela reacciones químicas que aportaban la energía suficiente para el decurso de la onda de choque por el explosivo.

Si este fuera el caso, las ecuaciones que describen las ondas de choque servirían también para describir ondas de detonación, por cuanto reflejarían el estado del gas explotado, y no el del gas por explotar. Sin embargo, un subsiguiente análisis reveló una importante diferencia entre las ondas de choque y las de detonación: mientras es posible encontrar ondas de choque débiles y de pequeña velocidad (pensemos en el movimiento lento del pistón), las ondas de detonación se comportan siempre con violencia y se propagan a grandes velocidades. La más lenta de las ondas detonadoras siempre será muy intensa; cuando de ella se trata, las ecuaciones de la onda de choque conducen a una única solución para la presión y la velocidad del material del gas detonado, pero si nos referimos a ondas más rápidas, encontraremos dos soluciones posibles.

Chapman resolvió la indeterminación apoyándose más en la estética que en un análisis riguroso: observando que la onda detonadora cursaba a una velocidad única y característica que dependía sólo del explosivo a través del cual se propagaba, dedujo que las condiciones para la detonación debían quedar definidas igualmente por un único estado. Y postuló así que la presión y la velocidad del material, en el estado de detonación de un gas explosivo, se definían por la velocidad mínima de la onda detonadora. En coherencia con esta proposición, Chapman calculó las velocidades de detonación y las comparó con las velocidades obtenidas en distintas mediciones experimentales. Mostraban un acuerdo notable.

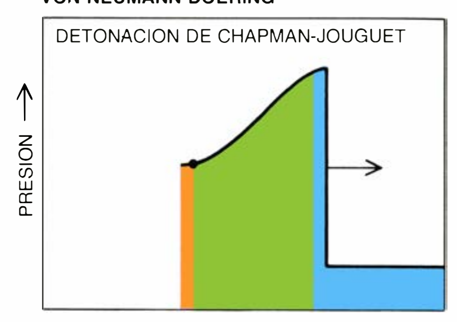
Por las mismas fechas, el físico francés J.C. Emile Jouguet, trabajando en frentes afines, demostró que la velocidad mínima de la onda detonadora correspondía a la velocidad de una onda sonora que se propagara en las condiciones de temperatura y presión de los productos de la detonación presentes en el explosivo. Significaba ello que había una explicación física de la propagación bajo las condiciones descritas para la mínima velocidad de detonación, de una onda detonadora estable, según había conjeturado Chapman: si una onda de detonación viajara a una velocidad superior a la velocidad mínima de detonación en virtud de una onda de choque inicial suficientemente fuerte, se movería a través del explosivo detonado un enrarecimiento que alcanzaría a la onda supercélere, frenándola.

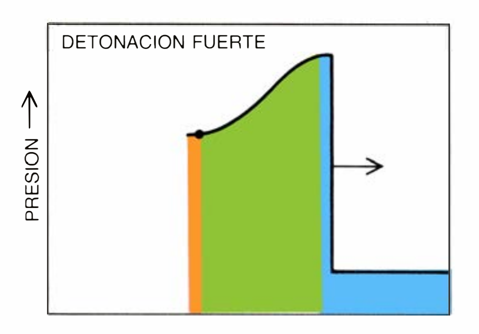
Entenderemos mejor el proceso si volvemos al cilindro del ejemplo. Al detenerse el pistón que produce la onda de choque, la velocidad del material que está frente al pistón disminuye rápidamente, hasta detenerse; en justa correspondencia, la presión cae y origina un enrarecimiento. Este se propaga hacia adelante con la velocidad de una onda sonora. Desde su posición rezagada, el enrarecimiento debilita la onda de choque, facilitando su aproximación. Cuanto más se acerca el enrarecimiento a la onda de choque, tanto más despacio avanza ésta, hasta que también ella cursa a la velocidad del sonido en el material.

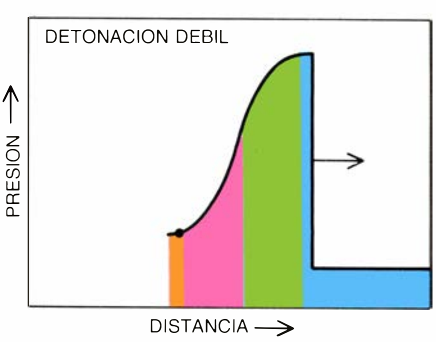
Los argumentos que Jouguet esgrimió sobre la presumible aceleración de la onda de choque hasta alcanzar la mínima velocidad detonadora, conocida por velocidad de Chapman-Jouguet, resultaban más complicados y menos convincentes. Pero no cabía discusión en torno a los datos experimentales, que parecían confirmar la exactitud de las predicciones de la teoría. Más aún, la teoría esbozada por Chapman y Jouguet constituye todavía el marco de referencia de acuerdo con el cual se construyen las teorías relativas a la detonación que gozan de mayor aceptación.

La teoría de Chapman-Jouguet no acababa de convencer porque no explicaba la física subyacente a la onda de detonación. Ello no impedía que, al predecir adecuadamente el estado final de un gas subsiguiente a la detonación, satisficiera a los ingenieros de mente





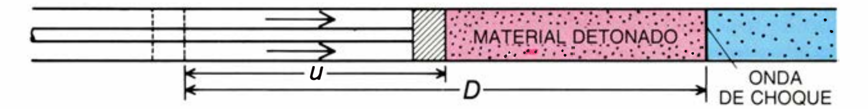




3. REPRESENTACION de una onda detonadora y su variación de acuerdo con la teoría seguida. La teoría de Chapman-Jouguet considera la onda detonadora como una discontinuidad entre dos estados distintos de presión y naturaleza química: el explosivo sin detonar, a baja presión, y el explosivo detonado, cuya presión es muy grande. La teoría de Zel'dovich-von Neumann-Doering separa el incremento discontinuo de la presión de las reacciones químicas que liberan energía (*verde*), que se dan en una zona de espesor apreciable. Además, se produce una caída de presión en la transición desde el explosivo sin reaccionar al explosivo que ya ha reaccionado. Aunque el estado final coincide con el que predice la teoría de Chapman-Jouguet, hay otros estados posibles. En una detonación fuerte, los estados inicial y final tienen mayor presión. En una detonación débil, el acoplamiento de una reacción que absorbe energía (*rojo*) con las reacciones que la liberan permite alcanzar un estado de menor presión.

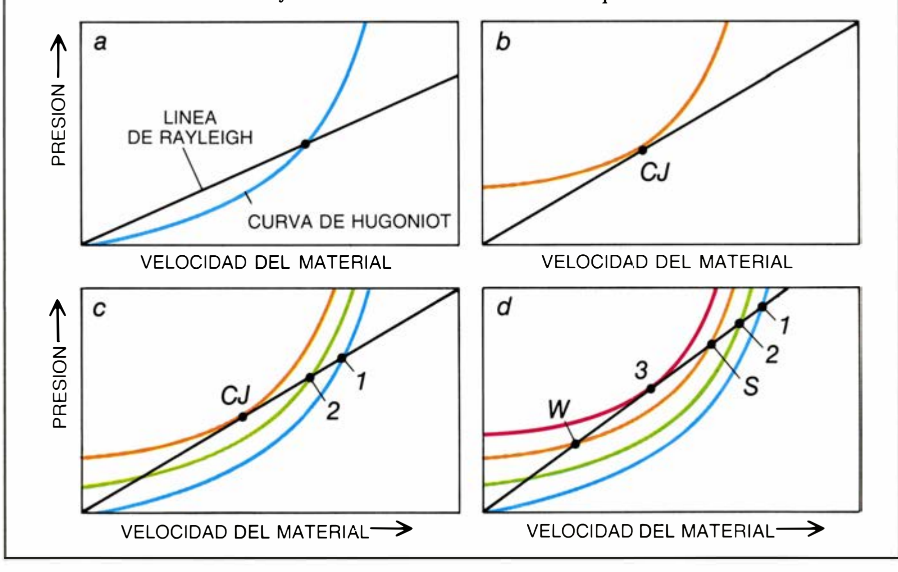
Curvas de Hugoniot y Líneas de Rayleigh

Sus intersecciones representan gráficamente el estado de un explosivo detonador



4. LA ONDA DE CHOQUE en el interior de un cilindro con un pistón en movimiento puede representarse mediante el plano de separación entre el fluido en movimiento (*rojo*) y el fluido estacionario (*azul*). Su velocidad es mayor que la del pistón (que coincide con la del fluido en movimiento): el pistón ha avanzado una distancia *u* mientras que la onda de choque ha recorrido un trecho mayor, *D*.

Se denomina curva de Hugoniot (*a*) la representación gráfica de todos los valores posibles de la presión en el material por donde ha pasado la onda de choque en función de todos los valores posibles de la velocidad del material. Se ilustran, también en el mismo sistema de coordenadas de la curva Hugoniot, todos los estados posibles (presión y velocidad) de un material para una velocidad dada de la onda de choque; resulta de ello una línea recta: la línea de Rayleigh, cuya pendiente es proporcional a la velocidad de la onda de choque. Se puede, pues, determinar gráficamente el estado final de un material sometido a una onda de choque de velocidad dada mediante el punto de intersección en que la curva de Hugoniot (*azul*) interseca la línea de Rayleigh. Si el material entra en detonación (*b*), su curva Hugoniot (*naranja*) cursa hacia arriba, toda vez que la presión de todos los estados posibles aumenta. De acuerdo con la teoría de Chapman-Jouguet, el punto donde la línea de Rayleigh es tangente a la curva de Hugoniot para un explosivo que ha reaccionado enteramente (*CJ*) especifica el estado a partir del cual los productos de la explosión se expanden, desarrollando un trabajo en el material del entorno. Este punto *CJ* fija también la velocidad de la onda detonadora que viene dada por la pendiente de la línea de Rayleigh. El mismo análisis puede aplicarse en la teoría ZND (*c*), aunque se requieran curvas de Hugoniot tanto para el explosivo que ha reaccionado parcialmente (*verde*) como para el que no ha reaccionado o para el que lo ha hecho por entero. El estado final puede seguir siendo *CJ*, pero la presión del explosivo es mayor en su estado sin reaccionar (*1*) y en su estado en que la reacción es parcial (*2*), antes de llegar a la curva de Hugoniot, en que la reacción ha concluido ya. En una detonación fuerte (*d*), la velocidad de la onda detonadora es mayor (la línea de Rayleigh se acerca más a la verticalidad). En este caso, el estado final (*S*) tiene mayor presión y velocidad del material que en el estado *CJ*. Bajo ciertas condiciones, se logra un estado transitorio cuya curva de Hugoniot (*rojo*) esté por encima de la curva del explosivo que ha reaccionado completamente. En ese caso de detonación débil, el explosivo puede alcanzar un estado (*3*), por debajo de *S*, que permite llegar hasta un estado final *W* dotado de menor presión y velocidad del material que el estado *CJ*.



práctica. El conocimiento del estado final de una reacción de detonación tiene para ellos gran importancia, pues a partir del mismo calculan la expansión de los productos de la explosión (principalmente nitrógeno, vapor de agua, monóxido de carbono, dióxido de carbono y carbono sólido en forma de hollín). La expansión de los productos de la explosión, como la expansión del vapor o gases de combustión en un cilindro de motor, constituye el medio a través del cual se transfiere energía al entorno (se trate de la carcasa de una granada o del bloque de una cantera), para realizar lo que técnicamente se conoce por trabajo.

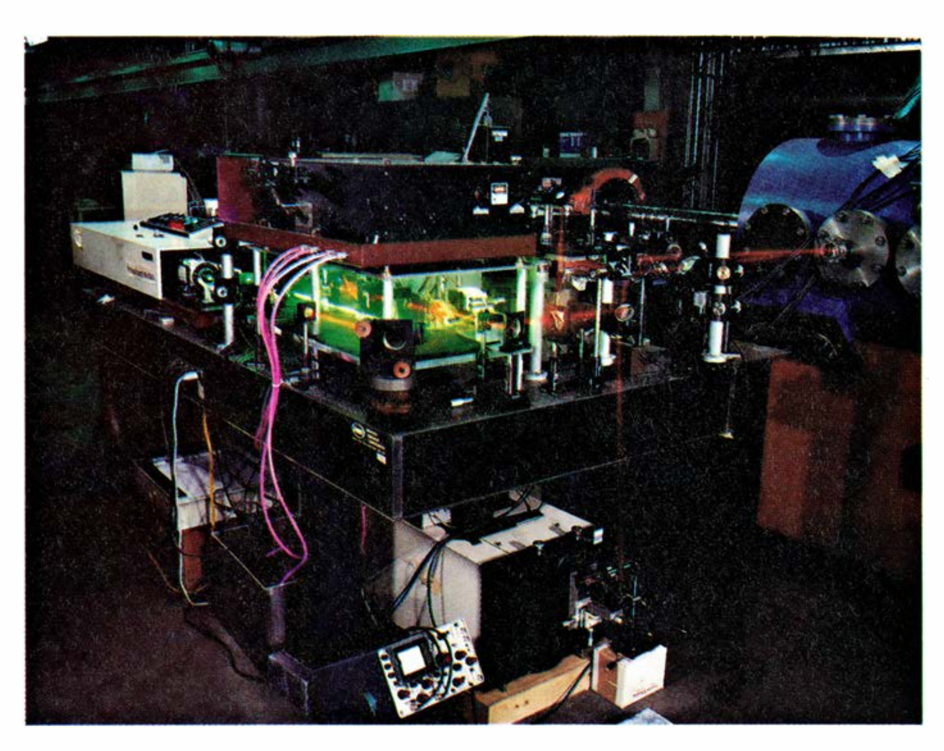
Estrictamente hablando, los cálculos basados en la teoría de Chapman-Jouguet sólo eran válidos para la detonación de gases explosivos, toda vez que sólo para ellos se conocían las ecuaciones de estado. Sin embargo, los ingenieros suponían que la teoría sería aplicable a explosivos líquidos y sólidos, siempre que pudiera obtenerse, con aproximación razonable, una ecuación de estado para una mezcla de gran densidad de materiales sólidos y gaseosos. Tal ecuación puede deducirse, teóricamente, de los principios fundamentales estudiando las fuerzas ejercidas entre moléculas, las formas de las moléculas sometidas a grandes presiones y el tipo de mezcla de las distintas moléculas en los gases producidos. Los investigadores de la primera mitad del siglo XX sólo pudieron inferir empíricamente estas ecuaciones de estado, a través de la medición directa de la incidencia, en las distintas propiedades de un material, de la variación de una propiedad. Las ecuaciones de estado así obtenidas, aunque de escaso valor ilustrativo desde una perspectiva científica, permitieron que los ingenieros calcularan el estado de un explosivo en la onda de choque con el grado de precisión suficiente para la mayoría de los objetivos propuestos entonces.

El primer esfuerzo importante por abordar la física subyacente al inicio de las reacciones químicas por parte de la onda de choque y la transferencia de energía desde aquellas hacia el flujo global de los productos de la explosión se debe al trabajo teórico de Yakov B. Zel'dovich, de la Unión Soviética, John von Neumann, de los EE.UU, y Werner S. Doering, de Alemania. Los tres físicos llegaron, cada uno por su cuenta, a las mismas conclusiones, y lo hicieron casi al mismo tiempo, a comienzos de los años 40. El punto clave consistió en considerar datos de partida

la temperatura y la presión de los materiales sometidos a la onda de choque, para concentrarse en el desarrollo de las reacciones químicas en el material sujeto de explosión. En otras palabras, en un material explosivo la onda de choque recibe el tratamiento propio de una discontinuidad de las propiedades del material: el material situado detrás de la finísima onda de choque se encuentra sometida a presiones y temperaturas muy elevadas, lo que no ocurre con el que se halla delante. Las reacciones químicas de los explosivos, en cambio, se las supone transcurriendo tras la onda de choque, después de un tiempo corto y finito, en una zona de reacción uniforme de espesor apreciable, aunque pequeño.

Esta idea forzó a los tres investigadores a reconsiderar la teoría de Chapman-Jouguet, que atendía sólo al estado final del explosivo detonado. Afirmaron que, detrás mismo de la onda de choque, el explosivo se halla en un estado donde aún no se ha producido ninguna reacción química; un poco más atrás, hacia el final de la zona de reacción, se alcanza un estado en que todas las reacciones químicas que liberan energía han concluido. Entre la onda de choque y el extremo final de la zona de reacción debe haber otros estados de reacción parcial del explosivo. Se produce, pues, una secuencia de estados químicos en la zona de reacción, cada uno de ellos con una presión y una velocidad del material características.

El modelo de detonación de Zel'dovich-von Neumann- Doering (ZND) otorgaba a los científicos una bella descripción de cómo procedía la detonación: la onda de choque se propagaba por un material explosivo no perturbado, lo comprimía y lo calentaba instantáneamente hasta desencadenar las reacciones químicas que, durante varios nanosegundos, liberaban energía. A su vez, la energía conserva las condiciones de gran presión y temperatura necesarias para inducir hacia delante la onda de choque. Terminadas ya las reacciones, en el punto extremo de la zona de reacción, los gases se expanden realizando trabajo. La expansión que se produce allende esa zona sólo perturba ligeramente las reacciones. La velocidad de la onda de detonación ha de coincidir, como mínimo, con la velocidad de Chapman-Jouguet. Si es igual, el estado final del explosivo (y el estado inicial a partir del cual los productos explosivos se expanden para producir trabajo) será idéntico al estado final especificado por la teoría de Chapman- Jouguet. Pero si la velocidad es mayor, resultan posibles dos estados finales: uno, con mayor presión y mayor velocidad del material que las estipuladas por la teoría de Chapman-Jouguet; otro, con menor presión y velocidad del material. (Ambos estados de detonación en teoría posibles son esencialmente los que Chapman había obviado al ceñirse arbitrariamente a los estados de detonación únicos.) Aunque sus ecuaciones admitían dos estados finales, la teoría ZND rechazaba la existencia física de un estado dotado de presión y velocidad del material menores, por cuanto no parecía haber vías de reacción que condujeran al mismo. Todas las reacciones tenían que haber concluido para cuando se alcanzara el estado dotado de presión y velocidad del material mayores. Se denomina detonación fuerte aquella que produce un estado final que presenta una presión y una velocidad del material superiores a las que prevé la teoría de Chapman-Jouguet.



5. ESPECTROSCOPIA DE LASER aplicada en un ensayo desarrollado en Los Alamos. Nos aporta información acerca de la composición y los estados vibratorios del material sometido a temperaturas y presiones extremas. Estos datos resultan necesarios para entender el comportamiento de los explosivos detonantes.

Acontece, sin embargo, que el argumento de Jouguet expuesto hace medio siglo se sigue aplicando a los episodios de detonación fuerte. (De acuerdo con el mismo, el enrarecimiento interacciona con la onda detonadora hasta frenarla.) Así pues, la onda de detonación termina por decelerar hasta alcanzar la velocidad mínima, es decir, la velocidad de Chapman-Jouguet, cuando el explosivo ha sufrido todas las reacciones. La teoría ZND, al calcular la energía transferida al material del entorno, parecía confirmar que el estado de Chapman-Jouguet constituía, de hecho, el estado apropiado a partir del cual comenzaba la expansión de los productos explosivos.

En un principio, los especialistas acogieron la teoría ZND con desconfianza e incredulidad. Parecía negar el sentido común. Al abordar la propagación de la detonación como si se tratara de un problema de flujo estacionario, sostenía la teoría que la presión caería con el progreso de la reacción; en razón del planteamiento del flujo estacionario, las ecuaciones equilibradoras de momento y energía a lo largo del frente de onda de la detonación precisaban del efecto en cuestión. La mayoría de los investigadores estaban convencidos de que la presión tenía que aumentar. Por ser tan brusca esa caída de presión (efecto que viene a durar un nanosegundo), los especialistas que, por aquel entonces, sólo podían medir el fenómeno de la detonación con escalas de tiempo del orden del microsegundo (una millonésima de segundo), juzgaron la teoría a tenor de la argumentación subyacente. Después de un intenso debate inicial, se aceptó el modelo ZND de la detonación. Transcurridos diez años, los experimentos

confirmaban la disminución transitoria de presión predicha por la teoría ZND.

Vale la pena recordar que el propio von Neumann, mientras andaba apuntalando los principios de su teoría, habló de una vía de escape por la que se podía alcanzar el estado de detonación no permitido dotado de una velocidad por encima de la mínima. Aunque la mayoría de físicos tardaron veinte años en descifrar el sentido de las palabras de von Neumann, el asunto no encierra mayor misterio en cuanto se introduce una pequeña corrección en la evaluación de la energía o del calor liberado por el explosivo.

De acuerdo con la teoría ZND, se han de tomar en consideración los estados de reacción parcial del explosivo. Imaginemos qué ocurriría si la reacción de explosión constara de dos etapas, la segunda de las cuales absorbiera parte de la energía producida durante la primera; en otras palabras, que la primera etapa fuera exotérmica y, endotérmica, la segunda. Si la primera etapa se desarrollara con una rapidez mucho mayor que la segunda, el calor liberado por la explosión crecería como si nos halláramos en una explosión de etapa única, pero alcanzaría con el tiempo un máximo, para caer luego hacia un nivel menor y último. Durante el tiempo de máxima liberación de calor, se sucederían estados transitorios; éstos aportarían una senda que facilitaría la llegada de la reacción de explosión a un estado dotado de unos valores de presión y velocidad del material menores que los del estado especificado por la teoría de Chapman-Jouguet. Sabido es que en ésta se atiende sólo a la producción final de calor de la reacción y se ignora las variaciones en la salida de calor hasta alcanzar dicho estado.

Los estudios realizados, en el Laboratorio Científico de los Alamos, por William W. Wood, Zevi W. Salsburg, Jerome J. Erpenbeck y otros científicos a comienzos de los años 60, mostraron que este tipo de reacción, denominada detonación débil, propia o patológica, se consigue también acoplando otros procesos que absorban energía de la reacción exotérmica primaria, distintos de las reacciones endotérmicas. Por ejemplo, las detonaciones reales (en contraste con los modelos idealizados de los que hemos venido tratando) no se distinguen por una combustión regular y lenta en la zona de reacción. Al contrario, se propagan por esta zona ondas de presión, con un ángulo recto con respecto a la dirección de propagación de la onda de detonación. Las ondas inducen flujos turbulentos que extraen energía de las reacciones químicas de la explosión. El resultado neto se parece mucho al de un sistema con una reacción exotérmica a la que suceda otra endotérmica: las reacciones químicas liberan calor, que se disipa en flujo turbulento. Con toda probabilidad, la turbulencia es la causa de que el estado final de los gases detonados difiera del estado de Chapman-Jouguet y se acerque más al que se predice suponiendo la detonación débil.

Aún hay otro modo de producir una detonación débil; y es verosímil que se trate del proceso común en las detonaciones habituales (en contraste con las detonaciones experimentales que, a menudo, se desencadenan con ondas planas). Una onda de detonación libre se expande desde su punto inicial con una forma curva, como los rizos o las ondas que aparecen cuando tiramos una piedra en un estanque. Puede considerarse de hecho que este tipo de expansión de la onda detonadora tiene un mecanismo de absorción del calor, toda vez que el flujo divergente de material desvía energía en direcciones distintas de la seguida por el movimiento. En aplicaciones prácticas, casi todas las detonaciones se inician en un punto (o en una pequeña región) y se expande, por lo que, en su inmensa mayoría, las detonaciones reales son débiles y no del tipo Chapman-Jouguet.

Existe una íntima relación entre la química y la mecánica de fluidos de las detonaciones; sin embargo, ambos modelos, el de Chapman-Jouguet y el ZND, abordan los dos procesos como si fueran distintos e independientes para acometer mejor el análisis de una detonación. Se llegó a sugerir que, aun cuando la turbulencia u otras perturbaciones similares de pequeña escala, nacieran del flujo mecánico de material de la zona de reacción, los efectos de tales perturbaciones en las reacciones

6. BOLA DE FUEGO de una explosión nocturna de una mezcla de 25 kilos de nitrato amónico y petróleo combustible; se ha formado por combustión de los productos de la explosión. (A la mezcla se le ha añadido parafina y azufre para intensificar el efecto.) Los rayos de la base de la bola de fuego constituyen trazas producidas por la combustión turbulenta durante la expansión de los gases originados en la explosión.

químicas, muy pequeños, no inducirían ningún cambio cualitativo en los modelos de detonación.

Pero la mayoría de los especialistas no cree ya que los efectos resulten despreciables; opina que la teoría de la detonación debe generalizarse e incluir los efectos de la turbulencia y de las ondas de detonación curvas, condicionadas ambas por el tipo de material inerte que rodea el explosivo. Además, los experimentos han revelado que el ritmo de reacción de un explosivo (y, por tanto, el espesor de la zona de reacción) puede modificarse mezclando partículas inertes o catalizadoras en el material explosivo; ello implica que la pureza química y la homogeneidad de un explosivo pueden condicionar su comportamiento en la detonación.

Otros efectos de pequeña escala inciden también en la dinámica de la detonación y merecen tenerse en cuenta. Detrás del frente de detonación, debido a la interacción entre ondas de presión transversales y la onda de choque, pueden quedar atrapados pequeños paquetes de explosivo sin detonar. Débiles fluctuaciones de densidad o temperatura de un explosivo pueden crear regiones de mayor temperatura: los así llamados puntos calientes, que modifican la propagación de la onda de choque al detonarse antes que lo haga el explosivo del entorno. Estas perturbaciones locales se resisten a la modelización, pues operan a una escala dimensional que es incluso menor que la escala de la zona de reaccción. Para complicarlo todo aún más, se acaba de señalar, tras cálculos recientes de ecuaciones de estado, que podrían no mezclarse según lo esperado los gases producidos en la explosión; antes bien, los gases se separarían durante la detonación en dos fluidos distintos. Si esto se confirma, habría que considerar entonces otra nueva escala dimensional.

La mecánica de fluidos esta alcanzando un nivel en que el ordenador posibilitará calcular tan importantes detalles. En este contexto, el desarrollo de ordenadores cada vez más potentes y de nuevos métodos para promediar los efectos de sucesos microscópicos complejos contribuirá enormemente al conocimiento y a la predicción de los complejos flujos fluidos que surgen de las interacciones entre las ondas de choque y el material explosivo en el frente de detonación. De manera similar, los físicos teóricos que aplican las ecuaciones de la mecánica estadística y de la cinética química para obtener, respectivamente, ecuaciones de estado y velocidades de reacción química deben contar con los físicos experimentales para ofrecer nuevos datos y verificar las predicciones avanzadas. En este sentido, la espectroscopía de láser, que permite medir fenómenos químicos a escalas inferiores a 100 billonésimas de segundo, constituirá una importante ayuda para ambos.

El carácter precario de la teoría general de la detonación constituye un reto permanente para los científicos. La necesidad de mejorar la teoría se hace patente en el modo de explosión conocido por detonación de pequeña velocidad, detectado ya hace muchos años. Si una explosión se inicia con un detonador fuerte, la onda de detonación avanza por la carga explosiva a gran velocidad: entre 6000 y 8000 metros por segundo en la dinamita. Modo de gran velocidad que la teoría general pretende describir (al menos de una forma idealizada) como una detonación de Chapman-Jouguet o , con mayor probabilidad, una detonación débil. Pero si se trata de un detonador débil, la onda se propagará con lentitud, entre 2000 y 3000 metros por segundo, y sólo parte del explosivo reaccionará con rapidez. Hay claramente en estas detonaciones factores distintos de los considerados por la teoría ZND.

Otro tipo de comportamiento que la teoría general no describe es la transición de combustión a detonación. Si una gran cantidad de explosivo de una planta de fabricación se enciende accidentalmente, arderá intensa y tranquilamente, como lo hacen muchos materiales no explosivos. Pero si hay suficiente explosivo, el frente de llama se acelerará hacia dentro del material y la presión en éste aumentará. Al crecer la presión, el material explosivo comenzará a fluir, comprimiendo y calentando el material en una distancia apreciable por delante de la llama. En el explosivo se producirá entonces, y de repente, la detonación a gran velocidad, sin que haya habido ninguna onda de choque externa inicial. No disponemos todavía de ninguna teoría convincente que dé cuenta de este proceso.

Los problemas citados son sólo dos ejemplos de los muchos con que se enfrentran los físicos y los químicos del área de los explosivos rompedores. No obstante la dificultad de su tratamiento, la resolución de los mismos mejoraría el rendimiento y seguridad al tiempo que se haría frente a las exigencias, cada vez mayores, de la moderna ingeniería de explosiones.

Simbiosis en las profundidades marinas

La notable densidad de vida de los humeros abisales se explica por la simbiosis mutuamente provechosa de animales invertebrados y las bacterias oxidadoras de sulfuros que colonizan sus células

James J. Childress, Horst Felbeck y George N. Somero

Los biólogos califican de desérticos muchos ambientes del globo; se trata de aquellas regiones donde la limitada disponibilidad de algún factor esencial, así agua, luz o algún nutriente, impone graves restricciones a la existencia de seres vivos. Hasta hace muy poco, la región abisal del océano se consideraba uno más de esos desiertos, cuya escasez de organismos debíase, en este caso, a la penuria extrema de alimentos.

Pero en las profundidades marinas encontramos un hábitat cuya densidad de vida iguala, si no supera, la habitual en cualquier otro ecosistema marino. Se trata del sistema de humeros o chimeneas hidrotermales, o manantiales termales abisales, situados en los centros de expansión del suelo oceánico. Los humeros, descubiertos hace sólo 10 años, se hallan a lo largo de las cordilleras del fondo del océano, donde se están separando las placas de la corteza terrestre.

En 1977, en una dorsal de expansión del océano Pacífico, a 320 kilómetros al nordeste de las islas Galápagos, los geólogos del submarino de investigación *Alvin* descubrieron, a 2600 metros de la superficie, un oasis bullente de vida. Había allí especies desconocidas hasta entonces para la ciencia, que vivían en oscuridad total en concentraciones muchísimo mayores de lo que se consideraba posible en las profundidades oceánicas. Gusanos tubícolas gigantes, de hasta un metro de longitud, grandes almejas blancas de 30 centímetros de largo y racimos de mejillones formaban densos agregados alrededor de las chimeneas hidrotermales. Había un número menor, pero también significativo, de quisquillas, cangrejos y peces.

Tal densidad biológica, absolutamente inesperada, resultaba también muy intrigante. Cualquier ecosistema depende de la presencia de productores primarios: organismos autótrofos (capaces de mantenerse a sí mismos) que sintetizan sus propios compuestos de carbono reducido, como los carbohidratos, a partir del dióxido de carbono. Las plantas verdes que convierten dióxido de carbono en carbohidratos en presencia de luz, denominadas fotoautrótofas, constituyen los productores primarios de la mayoría de los ecosistemas marinos y terrestres.

Resulta evidente, sin embargo, la imposibilidad del proceso de fotosíntesis a la profundidad de los humeros. Más allá de los primeros 200 o 300 metros por debajo de la superficie no penetra luz suficiente para sustentar la fotosíntesis. Traspasada la zona iluminada, la densidad de vida decrece rápidamente, puesto que es menor la cantidad de alimento. Los organismos que viven en las profundidades dependen de la materia orgánica que, desde la zona iluminada, o eufótica, les llega al suelo oceánico. La mayor parte de la materia orgánica se sintetiza, se consume y se recicla en la zona eufótica, y sólo una pequeña fracción se hunde hasta la zona abisal, afotoide, del océano. Pero el hecho estaba ahí: a 2600 metros, en los humeros, la vida bullía. ¿Qué característica singular del sistema de humeros hidrotermales explicaría la abundancia de vida a esas profundidades?

Parecía verosímil que la densidad de vida de esos manantiales oceánicos hallara su razón de ser en la temperatura. A diferencia de la mayor parte del mar abisal, muy frío (de dos a cuatro grados Celsius), las aguas de los humeros presentan temperaturas medias que van de los 10 a los 20 grados. Observaciones efectuadas a lo largo de los últimos seis años han demostrado, sin embargo, que la presencia de esa fauna única del ecosistema de los humeros no puede justificarse apelando a sus temperaturas moderadas.

Contamos ya con una explicación mejor para la existencia de esos oasis rebosantes de vida del suelo oceánico. Muestras de agua tomadas en los propios humeros y analizadas por John M. Edmond, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colegas, han revelado que en los manantiales termales submarinos, al igual que en muchas fuentes termales terrestres, abunda el sulfuro de hidrógeno. Este compuesto, rico en energía aunque muy tóxico, se encuentra a concentraciones elevadas en el agua que fluye a través de las grietas del suelo oceánico [véase "Fuentes termales en el fondo del océano", por John M. Edmond y Karen Von Damm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1983].

Desde hace años los biólogos sabían que los hábitats ricos en sulfuro, como es el caso de las fuentes termales terrestres, sostienen gran número de bacterias de vida libre. Igual que las plantas verdes, son autótrofas, pero no obtienen la energía para la fijación de carbono (la conversión de dióxido de carbono en moléculas orgánicas que sirven de nutrientes) a partir del sol, sino de la oxidación de sulfuro de hidrógeno.

Holger W. Jannasch, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, y David Karl, de la Universidad de Hawai en Manoa, aislaron bacterias de las aguas de los humeros y demostraron en una serie de experimentos que, en efecto, ciertas especies de las bacterias de los humeros eran autótrofas y explotaban el sulfuro de hidrógeno y otras formas reducidas del azufre en favor de su propia actividad metabólica. Tales bacterias oxidadoras del azufre podrían constituir la base de la cadena trófica de los humeros, al proporcionar alimento a las especies animales.



1. COMUNIDADES DE LOS HUMEROS HIDROTERMALES. Están constituidas por un grupo de especies insólitas de invertebrados. Densos racimos de gusanos tubícolas de hasta un metro de longitud se anclan en la roca basáltica a lo largo de las bocas de los humeros. Viven allí, a 2600 metros bajo la superficie del océano, mejillones (*amarillo*) y cangrejos de los humeros. (El cangrejo del centro de la fotografía parece que está intentado comerse un gusano tubícola.) Se distinguen invertebrados menores agarrados a los gusanos y a las conchas de los mejillones. La fotografía la tomó, desde el submarino de investigación *Alvin*, R. R. Hessler, de la Institución Oceanográfica Scripps, en una expedición a los humeros del valle de fractura de las Galápagos, en el Pacífico oriental.

No obstante la lejanía de su parentesco, las plantas verdes y las bacterias del azufre desarrollan una función similar en un aspecto importante: unas y otras son productores primarios. Mientras que los vegetales son fotoautótrofos, las bacterias oxidadoras del azufre, capaces de utilizar una fuente inorgánica de energía para impulsar la fijación de dióxido de carbono, se denominan quimiolitoautótrofos, o quimiolitótrofos: literalmente, consumidores de productos químicos inorgánicos; lo que significa que pueden vivir en plena autonomía, sin depender de una fuente externa de compuestos reducidos de carbono. Ambos grupos de organismos fijan dióxido de carbono a través de las reacciones bioquímicas que forman el ciclo de Calvin. Esta vía cursa en el caso de las bacterias de modo muy parecido a como lo hace en las plantas verdes: el producto final es, en ambas, carbono reducido [*véase la figura 3*].

Resultaba manifiesto, pues, que las bacterias del azufre eran las "plantas verdes" de los humeros y, su "luz", el sulfuro de hidrógeno y otros compuestos reducidos de carbono. Pronto se advirtió un motivo de complicación importante en ese modelo simple: uno de los animales dominantes en los humeros, el gusano tubícola *Riftia pachyptila*, parecía carecer de medio alguno con el que recolectar la abundante cosecha de bacterias del azufre que proliferaban en el agua envolvente.

La anatomía de *Riftia* constituye un caso insólito: es, en esencia, un saco cerrado, carente de boca, sistema digestivo o de cualquier otro medio de ingerir alimento particulado. En su ex-



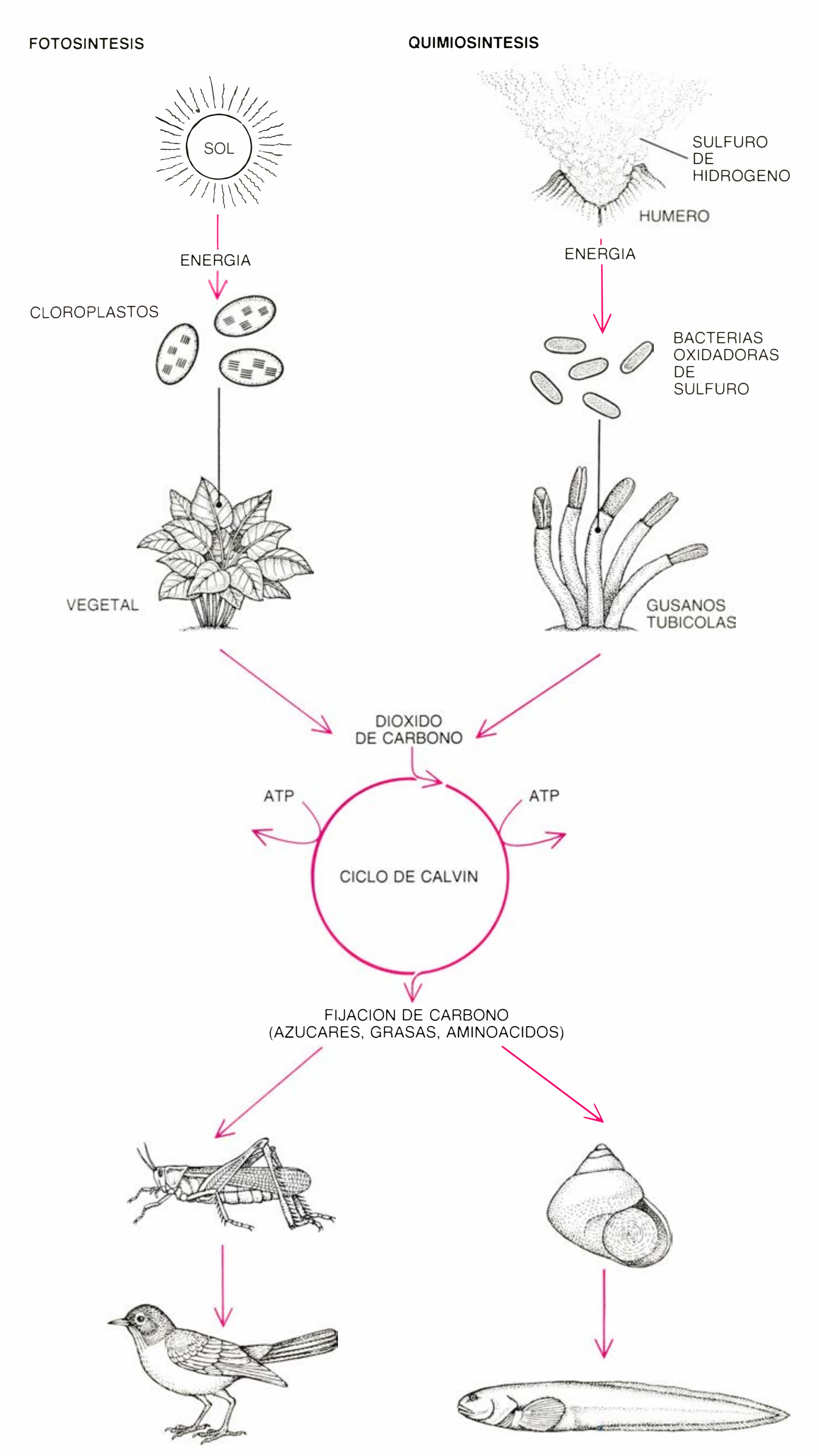
2. GRAN ALMEJA DE LOS HUMEROS, *Calyptogena magnifica*, arracimada a lo largo de grietas del suelo oceánico, por donde emerge agua rica en sulfuro, en un emplazamiento de la dorsal del Pacífico oriental. El pie de las almejas penetra en las grietas, donde la concentración de sulfuro es máxima. Las excrecencias que se distinguen sobre las rocas son colonias de bacterias oxidadoras de azufre. La ilustración se basa en una fotografía de Kenneth L. Smith, Jr.

tremo anterior hay un penacho branquial de color rojo vivo, donde se intercambia oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno con el agua marina ambiente. Por debajo del penacho aparece un anillo muscular, el vestimento, que ancla al gusano en su tubo blanco. El resto del animal consta, en su mayor parte, de un saco de paredes delgadas que contiene los órganos internos. El mayor de ellos, el trofosoma, ocupa casi toda la cavidad del cuerpo. Como sugiere su nombre ("cuerpo que se alimenta"), el trofosoma contribuye de modo significativo a la nutrición del gusano. Pero carece de un canal a través del cual pueda penetrar materia particulada del mundo exterior. La cuestión fundamental era la siguiente: a la vista de su anatomía insólita, ¿cómo se las arreglaba *Riftia* para obtener los nutrientes necesarios para sobrevivir?

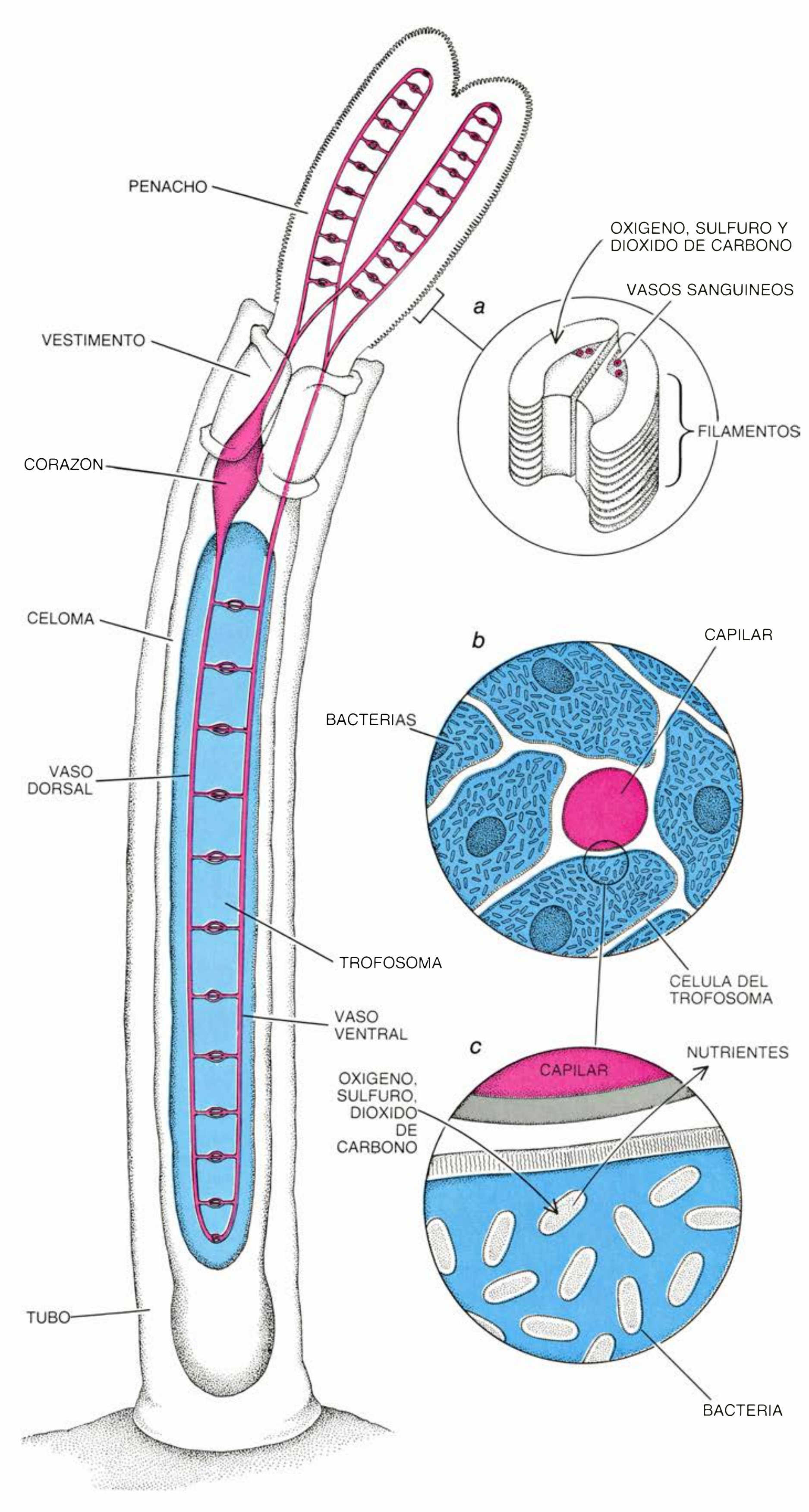
Estudios microscópicos realizados por Colleen M. Cavanaugh, de la Universidad de Harvard, y sus colegas, y estudios bioquímicos paralelos llevados a cabo por los autores de este artículo proporcionaron los primeros indicios. El examen del trofosoma de *Riftia* reveló que estaba colonizado por un elevadísimo número de bacterias oxidadoras del azufre. Vimos cómo las bacterias y *Riftia* habían establecido una relación endosimbiótica.

Por simbiosis se entiende la coexistencia de dos especies en la que la vida de una de ellas se encuentra estrechamente ligada a la vida de la otra. En la simbiosis se distinguen desde relaciones que son beneficiosas para un consorte y perjudiciales para el otro (parasitismo) hasta relaciones en las que los dos consortes obtienen beneficio (mutualismo). Cuando una especie, denominada simbionte, vive en el interior del cuerpo de la otra, a la que se llama patrón, u hospedador, se dice que la relación es endosimbiótica.

La endosimbiosis de *Riftia*-bacterias es mutualista. El gusano tubícola toma, de las bacterias, moléculas con carbono reducido y les ofrece a cambio las materias primas que necesitan para impulsar el metabolismo quimiolitoautótrofo: dióxido de carbono, oxígeno y sulfuro de hidrógeno, productos químicos esenciales que se absorben en el penacho y que el sistema circulatorio del patrón transporta hasta las bacterias del trofosoma. El trofosoma del gusano puede considerarse una fábrica interna, donde las bacterias serían los obreros que, en cadena, producen



3. COMPARACION entre fotosíntesis y quimiosíntesis. Las fuentes de energía difieren, pero el proceso de conversión y los productos finales son los mismos. En la fotosíntesis, la luz la absorben los cloroplastos de los vegetales; la fijación de carbono tiene lugar en el ciclo de Calvin, que rinde azúcares, grasas y aminoácidos, que entran en la cadena trófica, pasando de los herbívoros a los carnívoros. En la quimiosíntesis, la energía la proporciona el sulfuro de hidrógeno; lo toman las bacterias de vida libre y ciertos animales de los humeros, como el gusano tubícola, que lo transporta hasta las bacterias endosimbióticas. Estas lo oxidan; la energía liberada en la oxidación se aprovecha en el ciclo de Calvin. Los productos finales entran en la cadena alimentaria, pasando así directamente desde carnívoros de orden bajo hasta carnívoros de orden superior.



4. GUSANO TUBICOLA, *Riftia pachyptila*, anclado en el interior de su tubo protector externo mediante un anillo muscular, el vestimento. En su extremo anterior posee un penacho respiratorio. El oxígeno, el sulfuro y el dióxido de carbono absorbidos a través del penacho (*a*) se transportan por la sangre (*rojo*) hasta las células del trofosoma (*azul*). El trofosoma, sede de la quimiosíntesis, representa un sexto de la masa del animal y llena buena parte del celoma. Densas colonias de bacterias endosimbiontes habitan el interior de las células del trofosoma (*b*). El oxígeno, el sulfuro y el dióxido de carbono pasan de los capilares del gusano a las bacterias (*c*). Los nutrientes pasan de las bacterias a los capilares, para su distribución.

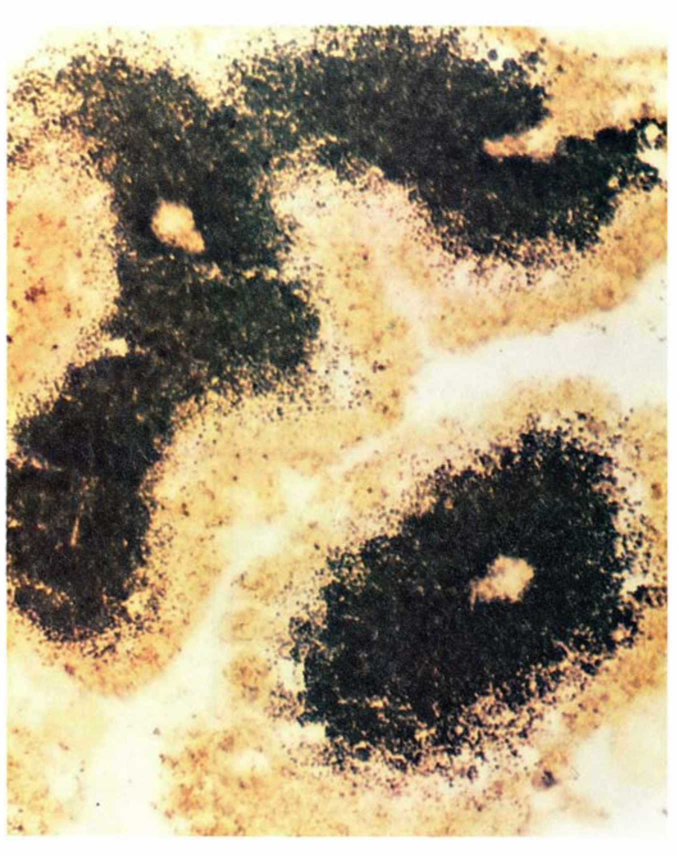
compuestos con carbono reducido y los pasan al patrón animal para que éste los utilice como alimento.

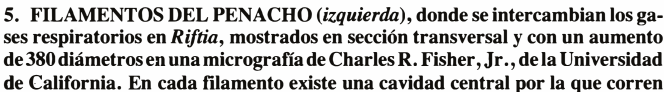
La capacidad de *Riftia* para absorber sulfuro del agua de los humeros y transportarlo a las bacterias de su trofosoma, sin envenenarse ni degradar el sulfuro, planteaba un problema en absoluto elemental. El sulfuro de hidrógeno es un compuesto muy tóxico, comparable al cianuro en su capacidad para bloquear la respiración, en cuyo proceso el animal consume oxígeno. En la mayoría de los animales, el sulfuro inhibe la respiración de dos maneras: bloqueando los sitios de enlace del oxígeno a su principal transportador, la molécula de hemoglobina, y envenenando una importante enzima respiratoria, la citocromo *c* oxidasa. Sin embargo, los estudios de *Riftia* demostraban que el sulfuro no afectaba al enlace del oxígeno y que el ritmo respiratorio del gusano se mantenía en niveles elevados incluso en presencia de concentraciones de sulfuro que resultarían letales para la mayoría de animales.

¿Cómo lograba *Riftia* mantener la respiración aeróbica aun en presencia de elevadas concentraciones de sulfuro? Resultaba evidente que el gusano debía salvar tres obstáculos. En primer lugar, tenía que disponer de un sistema de transporte especial que extrajera sulfuro del agua de los humeros. En segundo lugar, necesitaba transportar el sulfuro en su sangre sin permitir que compitiera con el oxígeno por los sitios de enlace de la molécula de hemoglobina ni que reaccionara con éste. (En presencia de oxígeno el sulfuro, muy inestable, se descompone rápidamente en formas oxidadas, como tiosulfato y azufre elemental.) En tercer lugar, precisaba un mecanismo mediante el cual el sulfuro no se difundiera hacia el interior de sus células y envenenara la respiración.

En colaboración con Mark A. Powell (en la actualidad en la Universidad de California en Davis) y Steven C. Hand (hoy en la Universidad de Colorado en Boulder) aislamos la citocromo *c* oxidasa obtenida de las células del penacho y examinamos su comportamiento en presencia de sulfuro. La citocromo *c* oxidasa es responsable del paso final de la cadena de reacciones metabólicas que constituyen la denominada fosforilación oxidativa; es ésta el proceso más importante de síntesis de adenosín trifosfato (ATP), la principal moneda energética de la célula, en los organis-







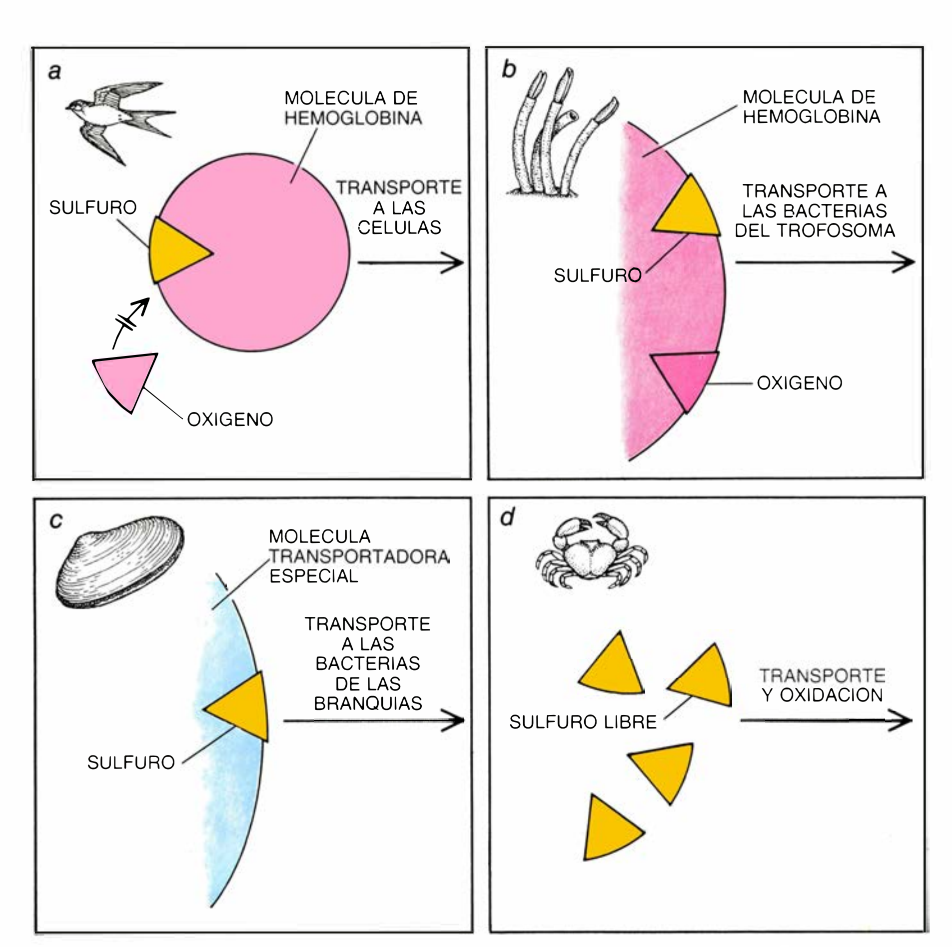
5. FILAMENTOS DEL PENACHO (*izquierda*), donde se intercambian los gases respiratorios en *Riftia*, mostrados en sección transversal y con un aumento de 380 diámetros en una micrografía de Charles R. Fisher, Jr., de la Universidad de California. En cada filamento existe una cavidad central por la que corren los vasos sanguíneos. Se tiñó una sección fina del trofosoma (*derecha*) con bencilviologeno, que se oscurece al exponerlo al sulfuro de hidrógeno. Se observa que el sulfuro está localizado en las bacterias. En esa micrografía, obra de Mark A. Powell, las células del trofosoma aparecen aumentadas 135 diámetros.

mos aerobios (los que utilizan oxígeno). En la mayoría de animales bastan concentraciones mínimas de sulfuro para inhibir la citocromo *c* oxidasa. Comenzamos, pues, con la hipótesis según la cual *Riftia* podía haber desarrollado una forma de la enzima que fuera insensible al sulfuro. Los experimentos mostraron que no era ese el caso: la citocromo *c* oxidasa altamente purificada de *Riftia* mostrábase tan sensible al envenenamiento por sulfuro como la citocromo *c* oxidasa de los demás animales.

Observamos, en ensayos realizados con esa enzima, que su sensibilidad al sulfuro dependía de hasta qué punto se hubiera aislado de otras proteínas del penacho. A medida que se iba purificando, nuestra preparación perdía el color rojo vivo y se incrementaba la sensibilidad de la citocromo *c* oxidasa al envenenamiento por sulfuro. El cambio de color sugería que algún producto de la sangre protegía a la citocromo *c* oxidasa de los efectos tóxicos del sulfuro. Comprobamos ese extremo añadiendo una minúscula cantidad de sangre entera a un sistema enzimático envenenado; casi de inmediato, la actividad de la citocromo *c* oxidasa recuperó su nivel normal, no inhibido. La observación demostraba que algún componente sanguíneo (quizá la hemoglobina) fijaba el sulfuro con más intensidad que el sistema de la citocromo *c* oxidasa, muy sensible al sulfuro, y con ello evitaba el envenenamiento de la respiración. Ese hallazgo y estudios simultáneos de la hemoglobina del gusano, realizados en 1982 durante una expedición al emplazamiento de los humeros, en la dorsal del Pacífico oriental, revelaron que, efectivamente, el papel de la hemoglobina resulta decisivo en el sistema de transporte interno del gusano.

Riftia dispone de un abundante suministro sanguíneo: el color rojo oscuro del penacho branquial se debe a la presencia de un gran volumen de sangre rica en hemoglobina, que supone más del 30 por ciento del volumen total del gusano. La concentración total de hemoglobina por litro (aproximadamente la mitad de la que se da en la sangre humana) es muy alta para un invertebrado. Por otra parte, la hemoglobina de *Riftia* difiere considerablemente de las hemoglobinas del hombre y otros vertebrados. Es de gran tamaño, de un peso molecular de hasta dos millones de dalton (la hemoglobina humana tiene un peso molecular de 64.000 dalton). En lugar de hallarse confinada en el interior de los glóbulos rojos, circula libremente por el suero. Posee, asimismo, una afinidad insólitamente alta por el oxígeno, así como una capacidad inusitadamente elevada de transporte de oxígeno. La hemoglobina de *Riftia* está, pues, bien adaptada para extraer oxígeno de las aguas de los humeros y para transportarlo hasta las células del gusano tubícola y sus simbiontes.

Existe una diferencia todavía más importante y llamativa entre la hemoglobina de *Riftia* y otras hemoglobinas: la molécula del gusano tubícola puede fijar simultáneamente oxígeno y sulfuro de hidrógeno. El hallazgo, obra de Alissa J. Arp (hoy en la Universidad estatal de San Francisco) y nuestra, vino a sugerir que el sitio donde se une el sulfuro a la molécula no es el mismo que el empleado por el oxígeno. Charles R. Fisher, Jr., de la Universidad de California en Santa Bárbara, demostró que la molécula de hemoglobina de *Riftia* estabilizaba mezclas de oxígeno y de sulfuro, con lo que evitaba la oxi-



6. LA GRAN TOXICIDAD DEL SULFURO para la mayoría de animales (*a*) provoca el envenenamiento de la respiración en dos niveles: en la sangre, donde se combina con la hemoglobina, y en las células, donde inhibe la enzima respiratoria citocromo *c* oxidasa (no mostrada). Los animales asociados a los humeros hidrotermales ricos en sulfuro han desarrollado diversas estrategias para evitar el envenenamiento por sulfuro. El gusano tubícola *Riftia pachyptila* (*b*) posee, en su molécula de hemoglobina, un sitio específico de fijación para el sulfuro; así, puede transportar en la corriente sanguínea, simultáneamente, oxígeno y sulfuro. La almeja de los humeros, *Calyptogena magnifica* (*c*), dispone de una proteína de transporte especial para llevar el sulfuro a las bacterias de las branquias. El cangrejo de los humeros, *Bythograea thermydron* (*d*), carece de bacterias endosimbióticas, pero detoxifica el sulfuro oxidándolo a tiosulfato, no venenoso.

dación espontánea del sulfuro. Por consiguiente, dedujimos que en el gusano tubícola la hemoglobina desempeñaba un papel doble: obviaba el envenenamiento de la respiración por parte del sulfuro y permitía el transporte de éste hasta el trofosoma sin oxidarse.

Tras su descarga en las células del trofosoma, el sulfuro se oxida, proceso que tiene lugar en los simbiontes bacterianos, como se demostró mediante una tinción especial que revelaba la presencia de sulfuro de hidrógeno. Investigaciones ulteriores por parte de nuestro grupo demostraron que la oxidación del sulfuro desencadenaba la síntesis de ATP y la fijación de dióxido de carbono. Además, demostramos que la actividad del ciclo de Calvin venía a ser la misma en las bacterias del trofosoma que en las hojas de las plantas verdes.

Estudios de otros animales de los humeros han revelado que *Riftia pachyptila* no es la única especie de las chimeneas hidrotermales que ha desarrollado una relación simbiótica con bacterias del azufre. La gran almeja blanca *Calyptogena magnifica* y el mejillón *Bathymodiolus thermophilus* explotan también endosimbiontes quimiosintéticos para obtener alimento. Pero esas especies han desarrollado soluciones muy distintas al mismo problema.

En *Calyptogena* las bacterias no se encuentran en un órgano interno, sino en las branquias, donde pueden obtener fácilmente oxígeno y dióxido de carbono del flujo respiratorio de agua. Empero, el modelo metabólico básico es el mismo: las bacterias oxidan el sulfuro y aportan a la almeja compuestos de carbono fijado. Como es el caso de otros invertebrados que albergan endosimbióticamente bacterias del azufre, *Calyptogena* presenta escasa capacidad de alimentarse y de digerir partículas.

En un primer momento nos intrigaron los datos recabados de las muestras de agua y de sangre. Las almejas debían concentrar sulfuro en la sangre, porque en ella el nivel de sulfuro era varios órdenes de magnitud superior a su concentración en el agua ambiente. Es más, por la orientación que adoptaban las almejas en el humero, la concentración de sulfuro en las aguas que bañaban sus branquias era baja. Así pues, ¿de qué fuente obtenían las almejas gigantes el sulfuro con que alimentaban a los endosimbiontes? Según se comprobó, utilizaban una ruta indirecta. Por lo que se puso de manifiesto, las almejas absorbían sulfuro a través del pie, amplio y alargado, que se extiende hacia el interior de los humeros hidrotermales, donde las concentraciones de sulfuro son más altas. Una vez absorbido de ese modo, el sulfuro se transportaba, por la sangre, hasta las bacterias de las branquias.

El transporte de sulfuro en la sangre de *Calyptogena* difiere notablemente del mecanismo que se ha descrito para *Riftia*. El sulfuro envenena de modo irreversible la hemoglobina de la almeja (incluida aquí en glóbulos rojos), por lo que no puede actuar ésta como proteína transportadora de sulfuro. *Calyptogena* ha resuelto el problema del envenenamiento por sulfuro desarrollando una proteína especial dedicada al transporte de sulfuro. Se trata de un polipéptido de gran tamaño, que circula en el suero y no en glóbulos rojos. La proteína ejerce también una misión doble: protege a la hemoglobina y a la citocromo *c* oxidasa del envenenamiento por sulfuro e impide que, en su recorrido hasta las branquias, el sulfuro se oxide. La unión del sulfuro a la proteína es reversible: en la branquia (mediante mecanismos todavía por descifrar), éste se descarga a las bacterias, que lo oxidan para obtener la energía que precisa el ciclo de Calvin.

Se conoce mucho peor la simbiosis en *Bathymodiolus thermophilus*. Igual que la almeja gigante, el mejillón posee simbiontes bacterianos en las branquias, pero aún no se han esclarecido las rutas del transporte y el metabolismo del sulfuro. Ello no obstante, una interesante serie de experimentos realizados por Kenneth L. Smith, Jr., de la Institución Oceanográfica Scripps, demuestra que la relación entre esos mejillones abisales y el agua de los humeros es obligada. Cuando alejó mejillones de la vecindad inmediata de un humero hasta una región más periférica, los animales evidenciaron sínto-

mas claros de inanición. Según parece, en los emplazamientos de los humeros hidrotermales se registra inanición de forma natural. Las chimeneas se mantienen en actividad a lo sumo durante algunas décadas. Donde ha cesado el flujo de agua aparecen esparcidos gran número de mejillones y almejas muertos, señal de que para esos animales la supervivencia no resulta posible sin un suministro de sulfuro.

La tasa de crecimiento constituye otra medida de la eficacia de la simbiosis a la hora de cubrir los requerimientos nutritivos de los hospedadores animales. El crecimiento acelerado y la rápida consecución de la edad reproductora que se observa en estas especies son reflejo de la elevada tasa de renovación de la vida en dichos emplazamientos. Estudios realizados por Richard A. Lutz, de la Universidad de Rutgers, muestran que las almejas y los mejillones de los humeros crecen tan deprisa como los bivalvos de desarrollo más rápido de las aguas someras.

El gusano tubícola, la almeja y el mejillón, las especies mayores y más abundantes de las que se encuentran en los humeros, deben su éxito ecológico a la simbiosis con bacterias metabolizadoras del azufre. Muchos de los animales menores y menos conspicuos de los humeros carecen de simbiontes. Obtienen los nutrientes filtrando del agua alimento particulado, por ejemplo bacterias, o alimentándose de las especies que alojan simbiontes. En este sentido, hemos observado cangrejos de los humeros nutriéndose del penacho respiratorio de *Riftia*.

No ofrecen menos interés los animales que carecen de simbiontes. La superficie del cuerpo de los invertebrados absorbe fácilmente el sulfuro, de ahí que los animales libres de simbiontes, igual que las especies que los contienen, han tenido que desarrollar mecanismos para evitar el envenenamiento por sulfuro. Con la colaboración de Russell Vetter, de Scripps, y de Mark Wells, de Santa Bárbara, examinamos esos mecanismos en el cangrejo de los humeros.

El ritmo cardiaco del animal y el batimiento de sus escafognatitos (los apéndices que conducen el flujo del agua respiratoria) no se alteraron cuando aumentamos las concentraciones de sulfuro muy por encima de los niveles normales en el agua marina ambiental, y el nivel de sulfuro aumentó sólo mínimamente en la sangre del cangrejo. Ante la imposibilidad de aislar de su sangre alguna proteína fijadora de sulfuro comparable a la hemoglobina del gusano tubícola, supusimos que la especie debió haber desarrollado alguna estrategia distinta para detoxificar el sulfuro. Descubrimos que el cangrejo puede detoxificar el sulfuro que absorbe oxidándolo a tiosulfato, una forma de azufre mucho menos venenosa. El proceso se realiza en el hepatopáncreas del cangrejo, un tejido cuya función es similar a la del hígado de los vertebrados.

Nos preguntamos si, en los animales que alojan simbiontes, cada patrón estaba colonizado por un único tipo de huésped bacteriano. Estudios recientes de las secuencias de un ácido ribonucleico (el ARN 16S) de los ribosomas bacterianos, realizados por Daniel Diestel y nuestro grupo en colaboración con Norman R. Pace, de la Universidad de Indiana, indican que la relación entre una bacteria metabolizadora del azufre y su patrón animal es característica de la especie, es decir, cada especie patrón alberga una sola cepa bacteriana. Pese al elevado número de especies de bacterias del azufre que han adoptado ese tipo de simbiosis, ninguna parece haberse acomodado a más de una especie de patrón. Presumiblemente, la endosimbiosis con bacterias del azufre se originó, de modo reiterado e independiente, en diversos grupos animales.

Nuestros descubrimientos relativos a las chimeneas abisales han propiciado la inspección de una amplia gama de ambientes ricos en sulfuro, entre los que citaremos las ciénagas de manglar, filtraciones de petróleo, albañales y marismas. Esos trabajos han revelado la ubicuidad de los tipos de simbiosis basados en el azufre que se descubrieron en las profundidades oceánicas, y han puesto de manifiesto también que en simbiosis análogas entre otros invertebrados y bacterias podrían explotarse otras moléculas inorgánicas ricas en energía, como el metano. Se han descrito tales simbiosis en grupos animales muy diversos, entre otros, ciertos parientes pequeños del gusano tubícola *Riftia*, almejas de diversas familias, algunos mejillones y varios grupos de pequeños gusanos marinos.

A medida que avancen nuestros estudios esperamos descubrir más ejemplos de aprovechamiento de simbiontes quimiolitótrofos por parte de los animales, que les capacite para tolerar y explotar hábitats que no podrían colonizar sin sus consortes bacterianos.

Juegos de ordenador

Sobre toros, valores y programas de parquet

A. K. Dewdney

En las bolsas de valores la planta donde se negocian las acciones suele denominarse "parquet", o "pozo". Allí, hombres y mujeres ya creciditos gritan, gesticulan y esbozan rápidos cálculos en el dorso de un sobre cualquiera. En esa olla de grillos se compran y venden acciones y otros valores a grito pelado y por medio de signos. ¿Se automatizará algún día ese proceso? ¿Sumirán los programas informáticos el parquet en un definitivo silencio?

La automatización ya está en marcha en el parquet, más amplio, que abarca al domicilio o la oficina del inversor. Ya se encuentran a la venta programas que efectúan análisis técnicos y análisis fundamentales del mercado de valores; los lectores pueden también redactarlos por sí mismos. Más similares a la bolsa genuina son los programas preparados por los llamados "lanzacohetes" de Wall Street. Se cuentan entre ellos programas que calculan el resultado de complicadas transacciones en las que intervienen gran número de valores, compensadas por futuras entregas de otros. No han sido pocos quienes culparon a ese tipo de maniobras, las "transacciones de programa", de la caída a plomo y en un solo día de las cotizaciones de la Bolsa de Nueva York en septiembre del año pasado. Todavía más cercanos al parquet se encuentran los programas que facilitan el proceso material de traspaso de los valores, tema que merecerá atención al final del artículo. Quién sabe si tales programas podrán ampliarse hasta encomendarles las transacciones propiamente dichas, asunto enrevesado, que ya ha sido motivo de disputa.

Convendrá, antes que nada, darse una vuelta por el parquet. Las transacciones comienzan cuando un inversor decide comprar, pongamos por caso, 100 acciones de Española de Tirantes (Estirasa). El inversor hace el encargo a un corredor quien (tras extraerle la debida comisión) traslada la orden a una sala de contratación de una bolsa donde cotice Estirasa. Si existen en ella acciones a la venta, un agente especializado en esa empresa cumplimenta la orden. En el momento oportuno se transfiere el importe de las 100 acciones desde la cuenta del inversor a la del vendedor, por intermedio del agente de cambio y bolsa. Simultáneamente se transfiere al comprador la propiedad de los títulos.

Si la cotización de Española de Tirantes aumenta mientras el bolsista ostenta la titularidad de los valores, quizás le convenga revenderlos y realizar beneficio. Por el contrario, si tal cotización desciende, el inversor puede conservar las acciones (con la esperanza de que vuelvan a subir), o ponerlas en venta con pérdida. Puede que en el primer caso el ánimo del bolsista sea optimista; el mercado adquiere un tono alcista, las cotizaciones de una serie de valores parecen subir sin límite y en la comunidad de los bolsistas se respira un ambiente de entusiasta optimismo. Nuestro inversor se siente inclinado a "colgarse" de sus valores, con la expectativa de que Estirasa, lo mismo que sus compañeras de cotización, acaben subiendo. En el segundo caso, los sentimientos del inversor son pesimistas. El mercado está plomizo; los precios tienden a bajar y la comunidad de bolsistas está escamada, cuando no temerosa o presa del pánico. Cuando el mercado de valores atraviesa una racha bajista intensa y prolongada, como la que sufrió Wall Street en 1929, se habla de un *crack*. Las consecuencias de un *crack* bursátil pueden ser catastróficas y provocar crisis bancarias, la quiebra de las empresas y desempleo generalizado. En resumen, un período de depresión económica.

¿Tomará nuestro bolsista la decisión de comprar o vender fundándose exclusivamente en el ambiente emocional dominante? La respuesta es, sin duda, que a veces sí. En otras ocasiones, el inversor puede fundarse en análisis más racionales. Dos son las grandes avenidas de que tradicionalmente se dispone: el análisis fundamental y el análisis técnico. La avenida del análisis fundamental basa la compra de acciones en la capacidad financiera o empresarial de la compañía emisora de las acciones. Más adelante comentaré tal enfoque.

El análisis técnico ofrece una fascinación mucho mayor a los amantes de gráficas y series numéricas. Convencidos de que la evolución pasada de los precios de las acciones interviene en la predicción de los precios futuros, los analistas técnicos se valen de un abanico de recursos a la hora de formular sus vaticinios. El más sencillo de éstos consiste en aprovechar las tendencias aparentes de los precios, sean al alza o a la baja. Imaginemos, por ejemplo, que la Española de Tirantes haya estado durante cierto tiempo cotizándose en torno a las 1000 pesetas por acción, y que recientemente su precio haya empezado a subir. En el caso de que la tendencia alcista sea suave y sensiblemente lineal, al analista técnico de clase C (categoría en la que se inscriben los novatos) podría ocurrírsele la singular idea de examinar un diagrama de cotizaciones de fechas recientes [*véase la porción superior de la figura 1*] y superponer lo más ajustadamente posible una regla sobre la línea de cotización. Si el precio en curso es de 1500 pesetas y la tendencia indica subidas aproximadas de 100 pesetas diarias, el analista podría comprar 100 acciones con la esperanza de cosechar 10.000 pesetas por día. ¡Lástima! El día mismo en que formalizó la compra la cotización comenzó a desplomarse

Hace entrada aquí el analista de clase B (aprendiz) quien, tras observar durante días y semanas una serie consecutiva de precios de las acciones, detecta en la cotización de Española de Tirantes una serie de altibajos, que trazan a modo de dientes de sierra. Observa también que los máximos son cada vez más altos. Vuelta a utilizar la fiel regla, pero esta vez para dibujar dos líneas [*véase la ilustración central de la figura 1*]. Una de las líneas limita las cotizaciones de las acciones por arriba; la otra lo hace por abajo. Entre ambas, un "canal", o franja en la cual el precio de Estirasa va trazando sus zigzags.

El analista de clase B puede explotar el canal de diversos modos. Por ejemplo, puede comprar los valores cualquiera que sea su cotización en ese instante, con la intención de conservarlos tiempo suficiente y aprovechar plenamente la tendencia alcista general. No obstante, cuando se propone actuar a corto plazo, el analista esperará a que el precio de Española de Tirantes toque el fondo del canal. Ese es el momento de "entrar", para realizar cuanto antes unos sabrosos beneficios.

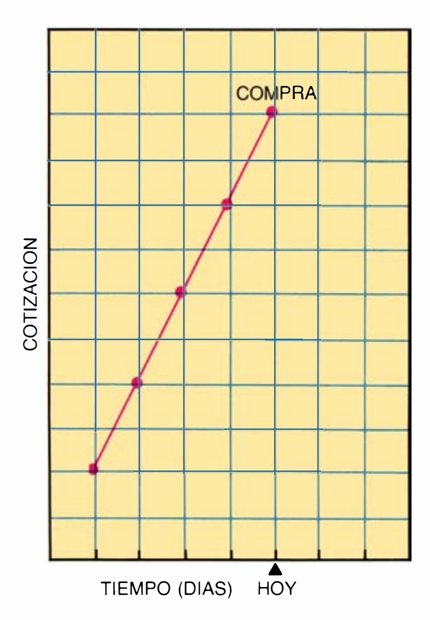
También la parte alta del canal ofrece oportunidades de inversión. El analista puede comprar valores en precario: adquiere 100 acciones a, pongamos por caso, 2000 pesetas cada una y las vende inmediatamente a ese precio, pero las paga más adelante, cuando la cotización haya bajado a 1500 pesetas. Las acciones tomadas en precario se pagan al precio nuevo, con lo que el inversor se embolsa la bonita diferencia de 500 pesetas por acción.

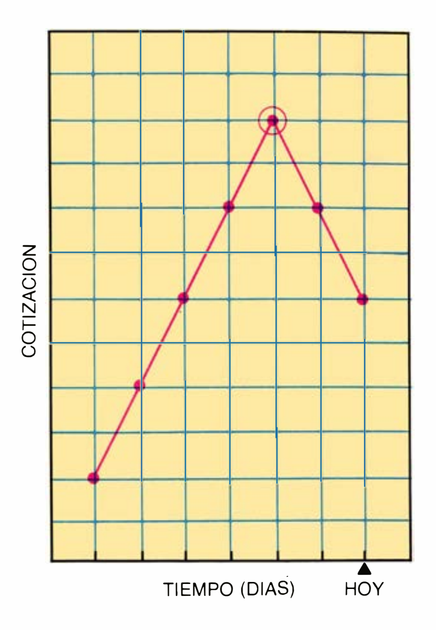
Los riesgos que se corren en uno y otro caso son evidentes. El analista de clase B quizá compre las acciones cuando el precio toca el fondo del canal. Convencido como estaba de que los precios rebotarían lo mismo que una pelota de tenis en un frontón, el analista de clase B contempla horrorizado la persistencia en la caída de la cotización. Con el estómago revuelto, recurre a un amigo de clase A (experto) para que le ayude.

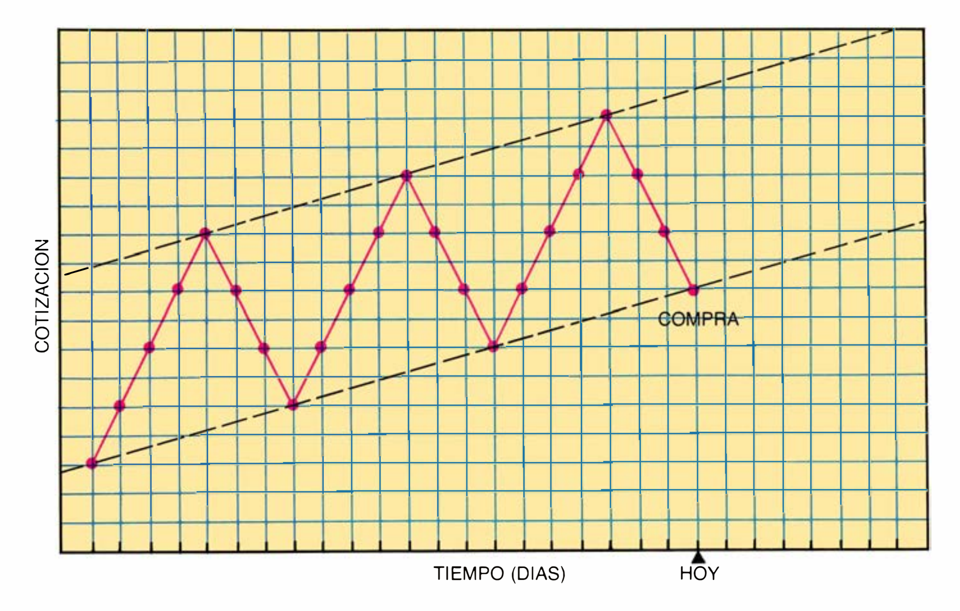
"Seguramente se trata de un canal nuevo", le dice el amigo sin apenas alzar la mirada de sus propios diagramas. Las semanas siguientes hunden a nuestro inversor en la miseria: el precio de la Española de Tirantes ha comenzado a oscilar a la baja, lo mismo que antes lo hiciera al alza. ¿Cómo detectó el analista de clase A la apertura de un nuevo canal? "Por su historial, amigo mío. Durante la primavera del año pasado ocurrió exactamente lo mismo."

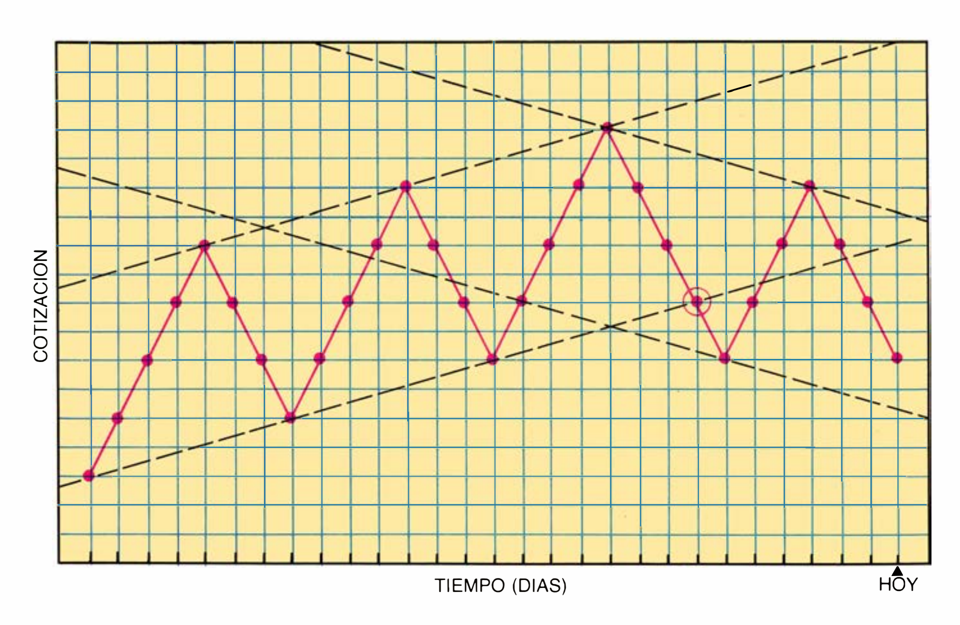
Me he servido del guión anterior —por inverosímil que parezca— para presentar las nociones de tendencia y de canal de operación. Como es obvio, el análisis técnico no se reduce a eso. El examen de los precios del mercado bursátil a lo largo de períodos prolongados revela oscilaciones de las cotizaciones en todos los niveles de amplificación temporal. En el seno de los grandes movimientos se advierten otros más pequeños, y así hasta el infinito. Las cotizaciones de los valores poseen una cualidad cuasi-fractal, a saber, la existencia de estructuras similares en todas las escalas de amplificación.

Una herramienta importante del instrumental del analista técnico es la llamada media móvil. Si, en vez de representar gráficamente la cotización diaria de un valor, se representa la media, móvil, correspondiente a una semana, o incluso a un mes, se alisan las fluctuaciones de corto plazo [*véase la figura 2*]. Como ya habrán adivinado casi todos los lectores, el valor de la media móvil correspondiente a un día determinado se calcula promediando los precios de cotización de un valor concreto a lo largo de los *n* últimos días,

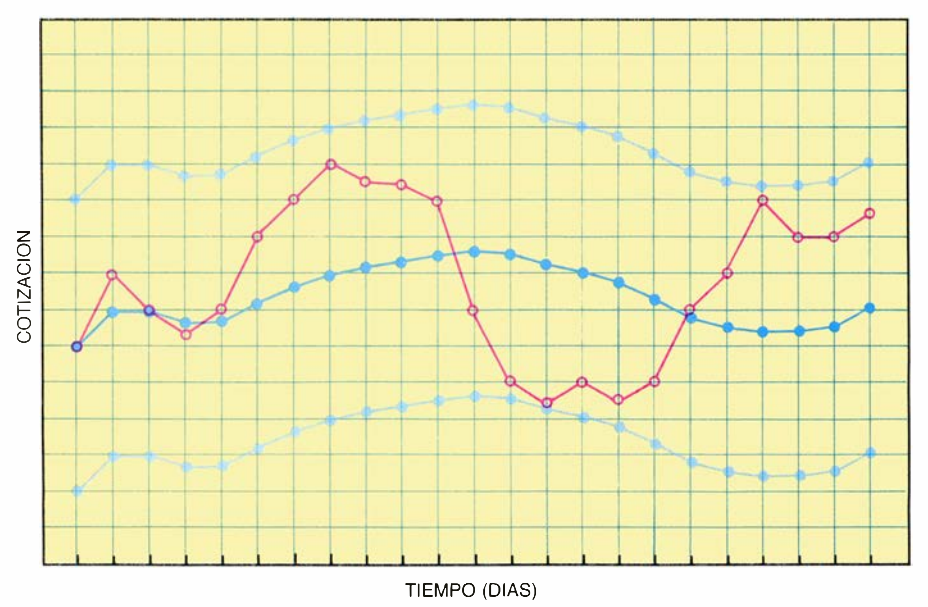








1. Riesgos que entraña la compra de Española de Tirantes por "razones técnicas"



2. Banda de transacción definida por el promedio móvil correspondiente a 10 días

siendo *n* el período que interese. El promedio incardina la virtud de la paciencia: cual potro indómito, la cotización podría encabritarse, pero si lo hace en torno a un mismo valor típico, la media móvil se mantendrá firme y asentada. Si la cotización se dispara hacia arriba o se hunde a plomo, el promedio móvil la seguirá en el mismo sentido, pero más lentamente, como de mala gana. Al retornar la cotización a posiciones anteriores, su gráfica quizá cruce la de la media móvil, cual hija pródiga que volviera a casa.

La media móvil puede utilizarse también para establecer lo que en análisis técnico se denomina banda de transacción. Si, una vez trazada la curva de la media móvil, se desplaza arriba y abajo, puede que la banda así definida encierre el margen en el cual vibra y oscila en su mayor parte la curva de las cotizaciones. Resulta mucho más sencillo analizar las suaves formas de las curvas que limitan la banda de transacción que los sobresaltos y altibajos de los precios encerrados en ella. Cuando la banda muestra una tendencia o una regularidad, el analista técnico quizá se sienta inclinado a aprovecharla. La banda de transacción puede denunciar también que unas acciones se encuentran infra o sobrevaloradas. Por ejemplo, no faltan quienes consideran que las excursiones esporádicas del precio de la acción por encima de su banda son señal de que se está comprando por encima de su valor real y de que la cotización no tardará en hundirse.

Se describen las técnicas precedentes, y otras muchas, en la obra *The Dow Jones–Irwin Guide to Investment Software*, de Robert Schwabach, según el cual los poseedores de microordenadores tienen a su disposición alrededor de 200 programas comerciales para la planificación de inversiones. El libro describe los programas punteros orientados tanto al análisis técnico como al fundamental, y va incluso más allá, pues analiza programas de gestión para cartera de valores, hojas de cálculo e incluso programas que, en palabras de Schwabach, le permiten a uno "conectar con el filón principal", merced a un modem que, conectando telefónicamente el ordenador personal con la base de datos de un gran ordenador, brinda al usuario datos del mercado de valores, tanto de tipo histórico como del instante presente o, como se dice en la jerga informática, "de tiempo real".

Sin necesidad de traspasar el umbral que tanto lleva a riquezas sin cuento como a la quiebra, los lectores emprendedores pueden redactar programas propios que les permitan degustar al menos algunos de los platos más humildes del análisis técnico. Es preciso ante todo aprovisionarse de datos sobre el mercado. Existen dos fuentes: una de datos reales; la otra de datos imaginarios. La forma barata de disponer de precios auténticos de valores bursátiles consiste en espigar las cotizaciones de unos cuantos tipos de acciones de entre las publicadas en los diarios de la localidad. Por ejemplo, pueden registrarse 10 clases de acciones de nuestro interés en otras tantas tablas, que formarán parte del programa que llamo TECHNIX. Conviene dar a las tablas los nombres de los valores a estudiar y el tamaño adecuado al período que se pretende analizar. Por ejemplo, podríamos tener tablas encabezadas *fasa*, *enher, fecsa*, *ert* y similares, todas suficientemente grandes para alojar datos correspondientes a 365 días. Un procedimiento más rápido, aunque indudablemente más caro, consistiría en suscribirse a un servicio de información que proporcione tales datos por vía telefónica, a través de un modem.

La generación artificial de precios es a un tiempo sencilla y económica. Bastan unos cuantos segundos para llenar una tabla de 365 elementos (a la que llamaremos *est*, por Española de Tirantes) invocando un cierto procedimiento de generación fractal de precios. Quizá recuerden los lectores el artículo de "Juegos de ordenador" de febrero pasado, dedicado a montañas fractales. El programa que llamé MONTAÑA dibuja la sección transversal de una montaña imaginaria a base de subdividir y desplazar repetidamente un único segmento rectilíneo. Como se apresuraron a señalar diversos lectores que probaron a redactar el programa, con la facilidad con que se obtiene una montaña se genera una cordillera entera. Más aún, si se comprime lateralmente el perfil resultante, el paisaje cobra un carácter decididamente financiero y semeja mucho la evolución gráfica de los precios de un valor cotizado activamente a lo largo de un año. Se distinguen subidas, bajadas y tendencias y canales ocasionales.

Si se carga al menos una de las tablas con precios, reales o artificiales, TECHNIX le aplicará toda una batería de instrumentos sencillos de análisis técnico. La herramienta más elemental es la media móvil. Bastará al efecto el breve algoritmo mostrado a continuación:

```
introducir período
introducir día
para i = período hasta día
  suma ← 0
  para j = i − período hasta i
  suma ← suma + est(j)
  media ← suma/período
  representar media
```

En esta descripción, *período* denota el número de días consecutivos utilizados en el proceso de promediación y, *día*, el día de transacción bursátil en curso, que se ha de dar como valor del índice de la tabla *est*.

Puede modificarse el algoritmo al objeto de que dibuje también bandas de transacción. Al efecto se inserta en el programa una nueva variable, *banda*. Debe asignarse a *banda* un valor que refleje los movimientos de precios típicos de las acciones que nos propongamos analizar. Por ejemplo, si Española de Tirantes no ha fluctuado en

más de un 4 por ciento de su valor en el 90 por ciento de las veces en que cotizó a lo largo de los últimos meses, el usuario de TECHNIX daría a *banda* el valor 4. El algoritmo presentado anteriormente se generaliza sin dificultad al objeto de trazar las curvas que definen la banda de transacciones. La curva superior se obtiene representando gráficamente el valor *media* + (*banda* · *media*)/100. La curva inferior tiene la misma fórmula, pero sustituyendo el signo + por un menos.

No ofrece más dificultad dibujar canales de transacción que bandas. Si el analista observa una tendencia lineal en las cotizaciones recientes, especificará desde el teclado un período de su interés, dando los valores de *día*1 y *día*2; *día*1 corresponde al primer día del período y, *día*2, al último. TECHNIX comienza estableciendo una recta de tendencia para las cotizaciones correspondientes al período de interés, y después la traslada hacia arriba y hacia abajo al objeto de definir el canal de transacción.

Existen diversos modos de trazar una recta de tendencia que resulte razonable. Seguramente el más rápido y sencillo sea el consistente en escindir en dos mitades los datos sobre cotizaciones. Designemos por *central* el día que se encuentre a medio camino entre *día*1 y *día*2. TECHNIX tiene previsto el cálculo de dos promedios, a saber, el precio medio de las acciones durante los días comprendidos entre *día*1 y *central* y el precio medio desde *central* hasta *día*2. Llamemos a esos promedios *media*1 y *media*2. No resta más que hallar los números de los dos días que ocupan la posición central en cada uno de esos dos tramos, pero su cálculo resulta trivial. Llamémoslos *c*1 y *c*2. La recta de tendencia es, por definición, la que pasa por los puntos de coordenadas (*c*1, *media*1) y (*c*2, *media*2). Seguidamente, TECHNIX incrementa la recta de tendencia hasta situarla por encima de todos los precios del segmento de interés. De modo análogo, el programa decrementa la recta de tendencia para hallar el borde inferior del canal de mercado, que suele denominarse, vana ilusión, línea de sostenimiento.

La ordenada *y* del punto de la línea de tendencia correspondiente al *n*-ésimo día del período viene dada por una fórmula de aspecto complicado, pero en esencia sumamente simple:

$$y = (media2 - media1) \cdot (n - c1)/(c2 - c1) + media1$$

Se trata, sencillamente, de la ecuación de línea recta, $y = m \cdot x + b$, donde m (la pendiente) es igual a $(media2 - media1)/(c2 - c1)$, x a $n - c1$ y, b (la ordenada en el origen), igual a *media*.

Constituiría un interesante experimento evaluar el grado de éxito que alcanzan los métodos de análisis técnico en el contexto del programa TECHNIX. Podría automatizarse la detección de canales de transacción, por ejemplo, aceptando cualquier canal cuya anchura fuera una fracción adecuada de su longitud; una cuarta parte, pongamos por caso. Los precios, tanto si proceden de un método fractal como de una fuente real, le irían siendo suministrados al programa experimental día a día. En cuanto se detectase un canal de transacción, el programa esperaría a que el precio tocase o casi tocase una de las líneas que limitan el canal. En la línea superior, el programa vendería en precario y acumularía los beneficios hasta que se produjera el primer cambio de tendencia de las cotizaciones. En la línea inferior el programa compraría acciones y realizaría beneficios en el primer cambio de tendencia. Por supuesto, puede que la línea de precios, tras alcanzar la frontera, persista en su tendencia. En tal caso el programa pierde dinero.

Es posible aplicar otras estrategias, pero su cuantificación resulta cada vez más difícil. Si la estrategia más sencilla, que se inspira en la esencia misma del método técnico, no logra obtener beneficios, ¿por qué habríamos de esperar que estrategias más complejas logren algo más que unos resultados ligeramente superiores?

Lo cual suscita la cuestión de hasta qué punto funcionan bien los métodos inspirados en el análisis técnico. Según Burton G. Malkiel, autor del popular *A Random Walk Down Wall Street*, no existe forma de predecir qué cotizaciones superarán de modo consistente el índice del mercado. Dicho de otro modo, podríamos lograr tan buenos resultados como el analista técnico promedio haciéndonos con una amplia cartera de valores seleccionados al azar. De ser tal el caso, el experimento recién descrito debería proporcionar resultados casi idénticos tanto en el caso de precios de generación fractal como de auténticas cotizaciones bursátiles. Le quedaré reconocido a los lectores que lleven a cabo tales experimentos, de los que daré cuenta aquí.

El profesor Malkiel mira con algo más de ternura a los inversores cuyos corazones se mueven por preocupaciones fundamentales. Por ejemplo, ¿qué pasivo tiene Española de Tirantes? ¿A cuánto asciende su dividendo por acción? ¿Resulta razonable el precio de la acción, habida cuenta de los beneficios? ¿Constituye Española de Tirantes una empresa pequeña, pero con fuerte potencial de crecimiento? *The Dow Jones-Irwin Guide* contiene también una sección dedicada a programas que se ocupan de examinar los conceptos fundamentales y que guían al inversor por los retumbantes vericuetos de la maquinaria pesada de las finanzas.

Los programas que más me fascinan son los que se encuentran más próximos al individuo que ocupa la posición clave del mercado: el especialista en valores que determina la cotización de los sometidos a su supervisión. El especialista tiene reservado el logro de beneficios, en potencia muy jugosos, a cambio de asumir la obligación de mantener limpio y ordenado el juego del mercado en las acciones que tiene a su cargo. Se le brinda la oportunidad de hacer dinero para su cuenta de resultados vendiendo las acciones a precio superior (precio demandado) al que ha pagado por ellas (el precio ofertado). En ocasiones también logra algo de dinero comprando acciones cuando ve subir los precios, o vendiéndolas en precario cuando le parece que bajan. El especialista puede, desde luego, ganar muchísimo dinero, y también, como es de pura justicia, perderlo.

En vista del reciente escándalo provocado por el descubrimiento de que se efectúan transacciones restringidas entre profesionales, por no mencionar los refunfuños que de vez en cuando provoca el papel del especialista, cabe preguntarse si no resultaría deseable remplazar al especialista por un programa diseñado para tomar a su cargo las operaciones de mercado. Lo cual suscita inmediatamente una segunda pregunta, a saber: ¿hasta qué punto puede remplazar un programa a un especialista?

La respuesta, evidentemente, es "hasta cierto punto". En la Bolsa de Toronto, por ejemplo, se encuentra actualmente en servicio el sistema informático para negociación bursátil más perfecto del mundo. Se denomina CATS, por *C*omputer *A*ssisted *T*rading *S*ystem, y descarga al especialista de algunas de sus tareas, cumplimentando automáticamente las órdenes de compraventa de poca cuantía que se presenten a los precios de oferta y demanda vigentes en ese momento. Al mismo tiempo, el sistema muestra las órdenes de compra y venta que se encuentran por debajo y por encima de los precios en curso. Tales órdenes corresponden a compradores y vendedores que tienen la esperanza de lograr mejores precios en el sentido en que

desean operar. Merced a tal información, cualquiera de los agentes autorizados con acceso a una de las 300 terminales del sistema CATS que se encuentran instaladas por todo Canadá puede conjeturar con alguna esperanza de acierto en qué sentido van a moverse los precios. La presentación de las órdenes exasperó a algunos de los especialistas de Toronto. Su libro de encargos, que fuera en tiempos reservado, pasaba a ser semipúblico.

¿En qué medida puede describirse y programarse explícitamente el papel del especialista en valores? No en su totalidad, según un antiguo especialista con quien he conversado recientemente: "A veces lo que se tiene es sólo una corazonada de cómo van a moverse los precios". Vale preguntarse hasta qué punto afloran los conocimientos del especialista por medio de la forma de cirugía de la entrevista hoy conocida por ingeniería del conocimiento. ¿Cuánto conocimiento se requiere para preparar un sistema experto capaz de efectuar transacciones bursátiles con rapidez, seguridad y equidad?. Estén atentos al número de octubre, donde seguramente se divulgarán las opiniones de algunos expertos en el asunto.

Conforme esta sección va generando grupos de interesados por cuestiones especiales, al apéndice final le corresponde cada vez más el papel de tablón de anuncios. El primer par de avisos de este mes proceden de los aficionados a la Guerra Nuclear. Los lectores que hayan solicitado el documento "Core War Standards" a Mark Clarkson, director de la International Core Wars Society, tendrán que armarse de paciencia, pues el incendio que sufrió el pasado mes de enero su casa ha provocado grandes retrasos en la cumplimentación de peticiones. No obstante, los competidores siguen preparándose para el segundo campeonato internacional de Guerra Nuclear, a celebrar en Boston el próximo otoño. Daremos detalles más adelante.

El principal anuncio del tablón de este mes lo inserta Carter Bays, el promotor de Vida tridimensional, quien confía en lanzar un boletín dentro de pocos meses. El artículo de abril se dedicó a dos juegos de autómatas celulares tridimensionales recientemente descubiertos por Bay. En lugar de ser cuadrados los que nacen y mueren, como en la versión original del juego descubierta por John Horton Conway, en el espacio tridimensional de Bays nacen y mueren cubos. En vista de que ha recibido alrededor de 500 cartas, Bays estima que su boletín tiene razón de ser. Confía en publicarlo trimestralmente y dar cabida en él a todas las observaciones de interés, sean suyas o de los suscriptores. Quienes le soliciten el documento "The Game of Three-dimensional Life", un folleto de 40 páginas, recibirán automáticamente un aviso en cuanto nazca el boletín, si llega a producirse el feliz acontecimiento. Para recibir Life envíense tres dólares a Bays, Department of Computer Science, University of South Carolina, Columbia, S. C. 29208, Estados Unidos.

Bays continúa a la caza y captura de símiles tridimensionales del juego de Conway. Recientemente ha descubierto dos criterios que parecen discriminar satisfactoriamente las versiones de más éxito de las menos interesantes. Su primer criterio es que el caldo primordial no debe proliferar ilimitadamente. Es decir, si se parte de un surtido aleatorio de células, éste no debe tender a expandirse eternamente. Su segundo criterio es que las sopas primordiales han de engendrar de vez en cuando los llamados "patines", esto es, configuraciones cíclicas de cubos vivos que van abriéndose paso serpeando a través de la pantalla.

Kerry Pearson, de Nanaimo, Columbia Británica, hizo saber de un análogo tridimensional del juego Vida, y le escribió a Bays dándole cuenta de un libro titulado *Ox*, de Piers Anthony. Anthony menciona en su libro un candidato a la Vida tridimensional, que en el parco léxico de Bays se denominaría Vida 6777. En esa versión, una célula cúbica viva morirá en la siguiente generación si en la generación presente tiene más de 7, o menos de 6, vecinas vivas. Cuando un cubo está muerto, resucitará a la vida en la generación siguiente si en la actual está rodeado exactamente de siete vecinas vivas. Bays informa haber investigado ya esta versión de Vida tridimensional, y ha encontrado que infringe el primero de sus criterios.

Bays ha aislado hasta el momento sólo dos candidatos a ser dignos sucesores del juego de Conway (como muchos lectores recordarán, se trata de Vida 4555 y Vida 5766). Por lo que a Bays concierne, el principal objeto de su indagación es la búsqueda de un cañón lanzapatines en cualquiera de sus dos versiones tridimensionales, que lanzaría patines en una o varias direcciones fijas.

Taller y laboratorio

Hablemos de desapariciones, incluida la del evanescente Gato de Cheshire

Jearl Walker

–¡Y a ver si dejas de estar apareciendo y desapareciendo tan de golpe, que mareas a cualquiera!

–¡De acuerdo! —dijo el Gato, y esta vez se desvaneció muy paulatinamente, empezando por la punta de la cola y terminando por la sonrisa, que permaneció flotando en el aire un rato después de haber desaparecido el resto.

–¡Bueno! Muchas veces he visto un gato sin sonrisa —pensó Alicia–, pero ¡una sonrisa sin gato!... ¡Esto es lo más raro que he visto en toda mi vida!

Lewis Carroll,
Alicia en el país de las maravillas

Hay dos mecanismos de escamoteo que han llamado mi atención por sus curiosos aspectos visuales. Me refiero al efecto "Gato de Cheshire" y al efecto "rino-óptico". El primero se manifiesta mirando simultáneamente dos escenas a través de un espejo colocado frente a un ojo. Entonces, si en una de las escenas se mueve algo, la otra escena puede desvanecerse durante varios segundos. Pero, a veces, la desaparición no es completa. Si la escena parcialmente borrada es la imagen de un rostro, quizá sólo quede la sonrisa, produciendo una visión inquietante, evocadora del famoso Gato de Cheshire de Lewis Carroll. En el efecto rino-óptico, un objeto se ve cuando apartamos la mirada, y se desvanece si lo observamos fijamente.

El efecto "Gato de Cheshire" lo descubrieron accidentalmente, en 1978, Sally Duensing y Bob Miller, en el Exploratorium, museo de San Francisco dedicado a la ciencia y la percepción. Hallábanse investigando acerca de la fusión binocular, el proceso mediante el cual el cerebro combina las dos imágenes separadas captadas por los ojos. Normalmente, no nos damos cuenta de ese proceso de fusión porque los ojos actúan con una diferencia de perspectiva muy leve. Se produce, a veces, aun cuando los ojos atiendan a escenas diferentes. Por ejemplo, mirémonos la mano con el ojo izquierdo y, con el derecho, observemos el reflejo de un orificio en un plano que, por lo demás, sea monótono e indistinto. En virtud de la fusión, lo que veremos será nuestra mano taladrada por un agujero.

Para separar las visiones, Duensing y Miller empezaron empleando un estereoscopio de espejos. Al mirar por el instrumento, el sujeto veía un rostro humano con el ojo izquierdo y una ilustración de una ventana de cuatro cristales con el derecho (reflejada cada visión dos veces en sendos juegos de espejos). En la visión resultante percibida por el sujeto la porción de ventana solapada al rostro desaparecía habitualmente, por la probable razón de que la complejidad de éste mermaba la capacidad del cerebro para fusionar por completo ambas escenas.

Para simplificar el experimento, sustituyeron la ilustración de la ventana por una barra horizontal delgada y colocaron un fondo blanco monótono detrás del rostro. Una mujer sometida al ensayo afirmó que la parte de la barra que parecía solaparse al resto aparecía más tenue y borrosa que el resto de la misma. Para determinar qué parte de la barra faltaba, uno de los investigadores quiso señalarla con la mano. Cuando la mano penetró en el campo visual del ojo derecho de la observadora, ésta advirtió, con una exclamación, que el rostro desaparecía por completo. Es decir, aunque la visión del rostro por el ojo izquierdo de la observadora permanecía sin obstaculizar, el rostro se había esfumado del plano de la conciencia. Parecía como si un mago hubiera agitado una mano en un escenario para escamotear una persona.

La supresión de parte de lo que un ojo ve tiene su origen en algún movimiento producido en el campo visual del otro. Este efecto lo pusieron de manifiesto Duensing y Miller con un juego de objetos móviles; entre ellos, un trozo de cuerda y un punto luminoso. A ese propósito sirve incluso un movimiento aparente: cuando uno de los espejos situados frente al ojo derecho se mueve levemente, el movimiento aparente que ve ese ojo borra la escena que registra el otro. La desaparición puede durar hasta cinco segundos, si los ojos se mantienen fijos y no hay movimientos en el campo visual borrado. Si los ojos se mueven, la escena ausente reaparece de inmediato.

Seguidamente, Duensing y Miller remplazaron la barra por un fondo blanco monótono, pero dejaron el rostro frente al ojo izquierdo del observador. Averiguaron así que la desaparición era, a veces, incompleta. Moviendo la mano sólo a través de parte del campo visual del ojo derecho, desaparecía la zona correspondiente en la visión izquierda, pero el resto persistía. Incluso cuando la mano barría todo el campo visual del ojo derecho, manteníase parte de la visión del ojo izquierdo. La zona persistente tendía a coincidir con la región donde la observadora fijaba la mirada con su ojo izquierdo. Así, si atendía directamente a la sonrisa del rostro, persistía la sonrisa; ahora bien, por quedar ésta solapada al fondo que veía el ojo derecho, el resultado era que la sonrisa parecía flotar en el aire.

En uno de los ensayos, Miller miraba por el estereoscopio y Duensing permanecía sentada de suerte tal que el primero pudiera verle la cara con el ojo izquierdo. Cuando Miller pasó la mano de un lado a otro del fondo blanco, fijó la vista en uno de los ojos de Duensing. La cara de ésta desapareció, salvo ese ojo. Entonces, ella apuntó con la mano a su otro ojo. Miller vio la mano, pero señalando una zona que aparecía vacía en su campo visual. Posiblemente la mano se hizo patente porque su movimiento forzaba el desvanecimiento de la parte correspondiente del fondo que veía el ojo derecho. Así, la desaparición puede provocarse y anularse a voluntad mediante un movimiento adecuado en uno de los campos visuales. Además, es selectiva con respecto a las partes afectadas de la visión.

No importa apenas en qué dirección se mueva la mano o un objeto dentro de un campo visual, pero el borrado resultará más seguro y completo con un movimiento lento. Es necesario que los ojos permanezcan fijos; si secundan el movimiento del objeto, no hay efecto de borrado.

Para comprobar de qué modo el movimiento borra selectivamente parte de una imagen, Duensing y Miller dispu-

sieron un observador de manera que viese dos campos que contenían siluetas [*véase la figura 3*]. Agitando las manos en la parte izquierda superior de la visión del ojo izquierdo y en la parte superior derecha de la visión del ojo derecho, la mitad superior de la imagen fundida se borró. Cualquiera de aquellas siluetas geométricas podía borrarse moviendo una mano por el correspondiente campo visual del otro ojo.

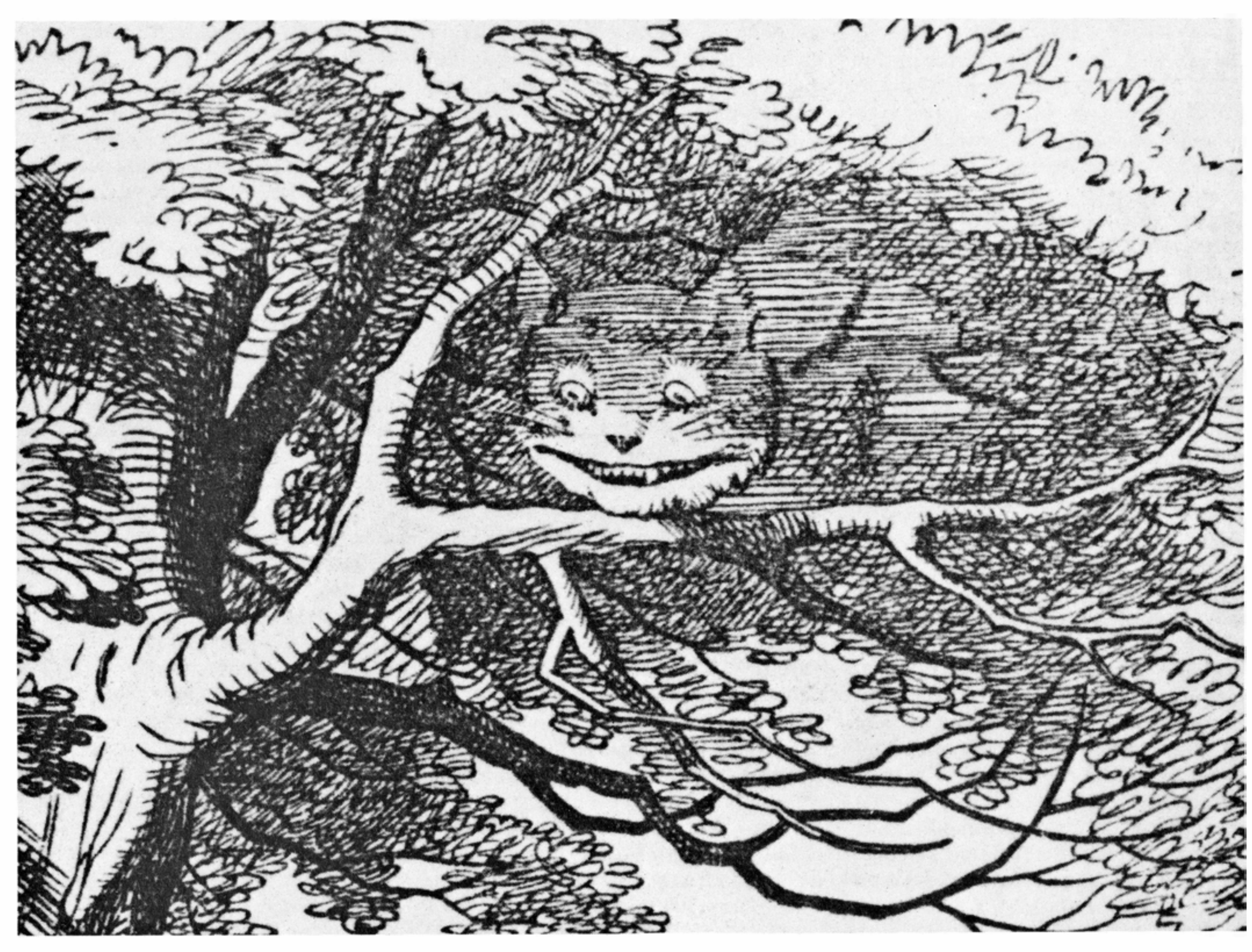
En una prueba similar, un observador veía un rostro diferente con cada ojo. Si los rostros permanecían estáticos, podían fusionarse parcialmente. Cuando parte de uno de ellos se movía, la correspondiente del otro desaparecía. Por ejemplo, si una persona revolvía los ojos, desaparecían los ojos de la otra. Si los revolvían las dos, se restablecía la fusión con el desconcertante resultado de que se movían ambos iris en cada uno de los dos cuencos de los ojos de la cara fusionada.

En la visión binocular, un ojo predomina sobre el otro al determinar de qué perspectiva se tendrá conciencia. Esto puede comprobarlo el lector personalmente enfocando su vista a un objeto cercano. Cierre luego el ojo izquierdo y examine qué perspectiva le da el ojo derecho de los objetos lejanos. Repita la acción con el ojo izquierdo. Con ambos ojos abiertos, ¿cuál de las dos perspectivas monoculares se acerca más a la perspectiva binocular que tiene ahora de los objetos distantes? En mi caso, suele predominar el ojo izquierdo. En el efecto "Gato de Cheshire", ¿borra el gesto de una mano realizado en el campo del ojo subordinado la visión del ojo predominante con la misma presteza y facilidad que al revés? En mi caso, sí. Pero algunas de las personas con las que hice pruebas me dijeron que el movimiento en uno de los campos borraba con mayor facilidad que el movimiento en el otro.

El fenómeno puede modificarse con la iluminación de ambas escenas. Así, Duensing y Miller descubrieron que el borrado era más exhaustivo cuando el fondo que veía uno de los ojos brillaba. Si además el rostro está bien iluminado y el observador fija la mirada en los ojos, éstos acaban reluciendo cuando se agita una mano en la otra escena.

En el Exploratorium se exhibe una demostración del efecto "Gato de Cheshire". Una persona se sienta en una cabina, mientras que otra se acomoda al otro lado de un mostrador que cruza la cabina de un costado a otro. Ambos lados se hallan cubiertos uniformemente de círculos de formica blanca. Ante el observador, hay una barra vertical con un espejo de dos caras acodado en ella. Rotando el espejo en torno a la barra, el observador puede elegir con qué ojo observar el fondo monótono de formica reflejado en el espejo. En cualquier posición, uno de los ojos ve a la otra persona. Para borrar el rostro de ésta, el observador mueve una mano a través de la imagen reflejada de la formica.

Hay un procedimiento más sencillo para reproducir el efecto "Gato de Cheshire". Apoye un espejo de bolsillo verticalmente en el borde de una mesa, o bien sosténgalo con una mano inmóvil. Gírelo de modo que refleje la escena a nuestra derecha. Esta debe consistir en una superficie vertical blanca que contenga un sencillo dibujo de líneas. Para ello, puede servir una



1. El evanescente Gato de Cheshire

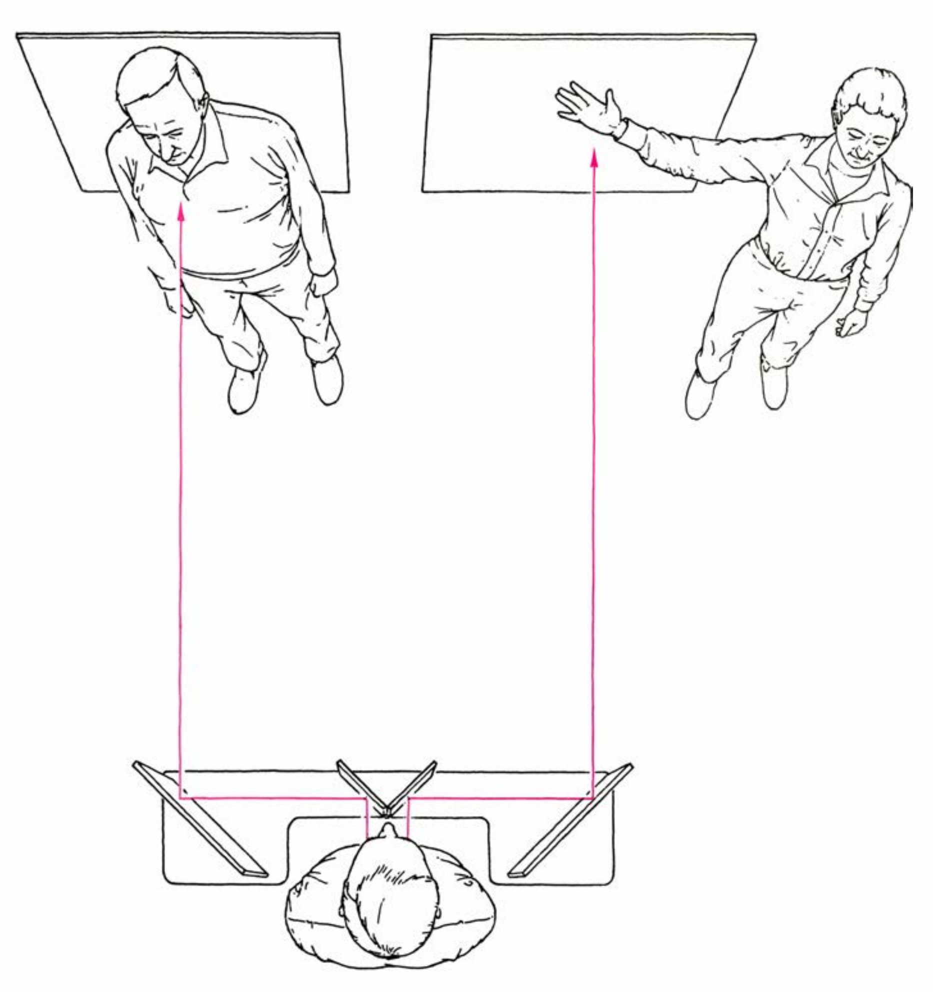
hoja grande de papel blanco con unos cuantos trazos oscuros. Coloque la cabeza en el borde de la mesa y ajuste la vista de suerte que el ojo derecho vea la imagen reflejada de la superficie blanca y el ojo izquierdo mire al otro lado de la mesa. Otra persona debe sentarse a ese otro lado de la mesa, en la visual del ojo izquierdo. Para eliminar una parte o el rostro entero de la otra persona, se pasará la mano derecha por la imagen reflejada de la superficie blanca. Para eliminar la imagen del dibujo de líneas, se pasará la mano izquierda por la visual del ojo izquierdo.

En un dispositivo similar, remplacé la superficie blanca por un televisor portátil. Con el ojo derecho veía la pantalla y con el izquierdo a mi esposa trabajando en la mesa. Cuando las imágenes que aparecían en la pantalla permanecían estacionarias, lograba fusionar parcialmente ambas visiones. Si un personaje se movía, gesticulaba o hablaba, se borraba la parte correspondiente de mi esposa. Cuando la escena cambiaba al desplazarse la cámara hacia otro ángulo, mi esposa desaparecía durante algunos segundos. Por mucho que lo intenté, fui incapaz de superar el efecto concentrándome.

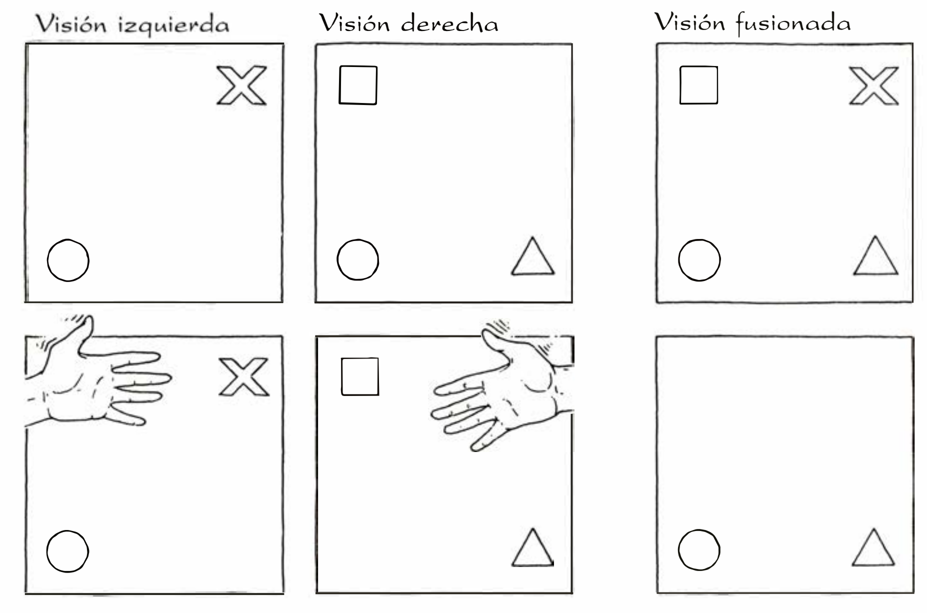
Conseguí también poner de manifiesto el efecto sin recurrir al espejo. Para ello, tras sujetar con una goma el extremo opuesto al lomo de un bloc de papel de escribir, coloqué éste de pie sobre una mesa, con su canto largo horizontal y perpendicular al borde de la misma. Puse luego la cabeza de manera que el bloc bisecara el campo visual y, así, con el ojo izquierdo veía la tapa coloreada y, con el derecho, el respaldo de cartón gris. El bloc venía a ocupar unos 84 grados en el campo visual nasal de cada ojo. Normalmente, predominaba mi ojo izquierdo, pero se daba una desconcertante fusión de ambas visiones con oscilaciones frecuentes entre ellas. Al mover una mano por cualquiera de las dos, desaparecía durante unos pocos segundos la del otro ojo.

Durante sus investigaciones, Duensing y Miller averiguaron que, ya en 1965, G.C. Grindley y Valerie Townsend, de la Universidad de Cambridge, habían escrito sobre el efecto "Gato de Cheshire"; lo denominaban "enmascaramiento cinético". Su dispositivo experimental era similar al aquí expuesto. Un observador se sentaba con el mentón descansando en un soporte que le inmovilizaba la cabeza. Con el ojo izquierdo, veía una pantalla de cartulina blanca y, con el derecho, una cartulina igual reflejada en un espejo. Se montó una varilla de madera negra para que girase barriendo el campo visual del ojo derecho a un ritmo regular.

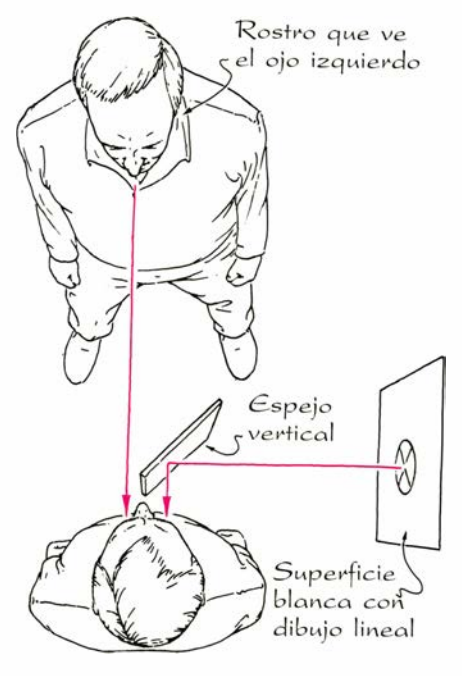
En la cartulina que veía el ojo izquierdo estaban marcados una *x* y un cuadrado pequeños. El observador fijaba la mirada en la *x*. Cuando se hacía rotar la varilla, ésta parecía cruzar por encima del cuadrado en virtud del fundido que el observador hacía de las dos escenas. Ese movimiento solía provocar la desaparición momentánea del cuadrado, esfumándose éste precisamente cuando la varilla parecía pasar por encima suyo, cual si lo borrase. En



2. Dispositivo estereoscópico ideado por Sally Duensing y Bob Miller



3. Elementos para poner de manifiesto el borrado selectivo



4. Superficie y espejo

otros ensayos, el cuadrado desaparecía inmediatamente antes o inmediatamente después de que la varilla pareciese pasarle por encima. Durante las pruebas, la mayoría de los 50 sujetos experimentaron los tres efectos. Aquel borrar de la varilla lo encontraron extraño y desconcertante. Uno de ellos declaró: "se comprende que hay una relación, pero no podría asegurar en qué orden".

A veces, el cuadrado desaparecía sólo en parte, desvaneciéndose por un lado u otro. Era difícil predecir la duración de la desaparición. En ocasiones retornaba bruscamente; otras veces lo hacía lentamente. Grindley y Townsend sugirieron que la reaparición repentina podía deberse al movimiento sacádico del ojo, que es un movimiento espasmódico e involuntario del mismo. Posiblemente, el movimiento aparente de la escena izquierda debida al movimiento sacádico capte la atención del cerebro y restaure la percepción del cuadrado. Cuando a los observadores se les pidió que siguieran la rotación de la varilla, el cuadrado no desaparecía nunca.

En otra serie de ensayos, se colocaron dos cuadrados a la misma altura en la cartulina que veía el ojo izquierdo. La varilla de madera se acortó, de modo que parecía pasar sólo por encima del cuadrado de la derecha. La mayoría de las veces sólo desaparecía este cuadrado, pero de vez en cuando se desvanecían ambos. Grindley y Townsend experimentaron, asimismo, con figuras complicadas en uno o los dos campos visuales. Cuando la varilla pasaba por encima de un objeto que veía el ojo derecho, desaparecía un objeto situado en la posición correspondiente de la visión del ojo izquierdo. A veces, cuando la varilla parecía rozar el borde de un dibujo, o algo que pudiera interpretarse como consistente, el objeto completo desaparecía inmediatamente.

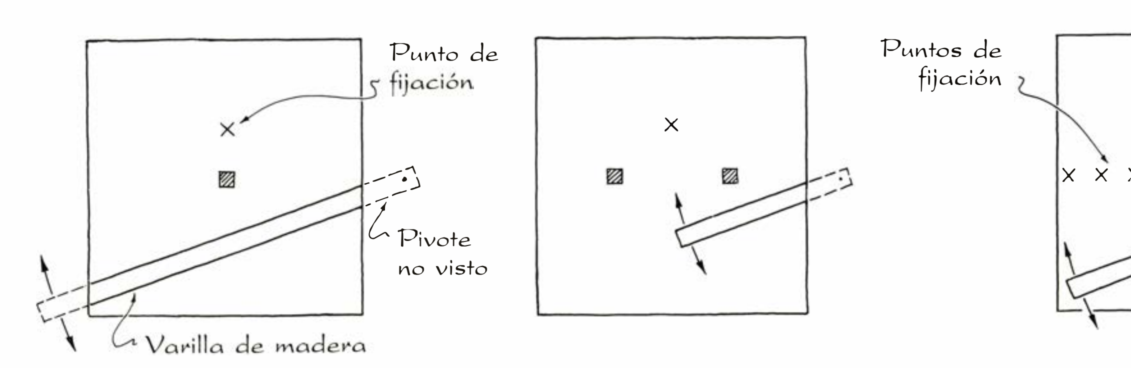
El efecto de borrado dependía de la velocidad de rotación de la varilla. Su mayor frecuencia se daba cuando la varilla se movía a 20 grados por segundo. La frecuencia bajaba hasta la mitad cuando la velocidad descendía hasta los cinco grados por segundo o crecía hasta los noventa. La duración del borrado no parecía estar influida por la velocidad de rotación.

Grindley y Townsend observaron que la proximidad del cuadrado y el punto en el que se fijaba el ojo izquierdo condicionaban la capacidad de la varilla de madera para borrar el cuadrado. A éste lo situaron en la parte derecha de la cartulina que veía el ojo izquierdo, e hicieron que el observador fijase la vista en un punto a la izquierda del cuadrado. Enfocó primero a un punto alejado del cuadrado. Tras unos cuantos tanteos, desplazó el punto de fijación más hacia el cuadrado, para hacer más tanteos. Resultó así que, conforme el punto de fijación se acercaba al cuadrado, la frecuencia de desaparición del mismo disminuía.

¿De qué modo realiza el efecto "Gato de Cheshire" el sistema visual humano? No tengo una respuesta segura, pero podemos especular un poco. Normalmente, el sistema visual trata de fusionar las visiones de los dos ojos para producir una sola visión coherente. Se llama punto de concentración aquel en el que se enfocan los ojos, pues es ese punto el que produce una imagen en la fóvea de cada ojo, y es en la fóvea donde la visión es más aguda. Las otras zonas de la escena forman unas imágenes menos nítidas en el resto de la retina. Quizá, como protección para la supervivencia, el sistema visual está "conectado" para alertar acerca de movimientos que se registren en la periferia del campo visual.

Miremos una escena situada frente a nosotros. Agitemos nuestra mano derecha en la zona extrema derecha de la escena, de modo tal que nuestro ojo izquierdo no pueda ver ese movimiento. Si nuestros ojos estuvieran contemplando escenas independientes, como cuando se ensaya con el efecto "Gato de Cheshire", el movimiento de la mano borraría la parte extrema derecha de lo que estuviéramos viendo con el ojo izquierdo. Pero, como nuestros ojos están observando casi la misma escena desde perspectivas ligeramente distintas, no se evidencia efecto de borrado alguno. Mi opinión es que sí hay borrado, pero no queda traza del mismo después de que la fusión establezca la conciencia de la escena. Ocurre que el borrado queda excesivamente separado de la visual para que capte nuestra atención, o bien que todos los detalles que pierde el ojo izquierdo los llena el ojo derecho.

Comprobé esta idea colocando, separados, dos objetos muy coloreados en la parte opuesta de la habitación. Puse en sus proximidades dos obstáculos, de modo que sólo podía ver los objetos con el ojo izquierdo. Al fijar la vista en un punto situado entre ambos, observaba los dos porque entonces pre-



5. Fusión de visiones en los experimentos de G. C. Grindley y Valerie Townsend

dominaba mi ojo izquierdo. Cuando agitaba la mano en el extremo derecho del campo de mi ojo derecho (el izquierdo no podía ver el movimiento), el objeto de la derecha desaparecía. El objeto de la izquierda seguía visible. Resulta obvia, pues, la posibilidad de borrar parte de una escena en unas condiciones de visión normales.

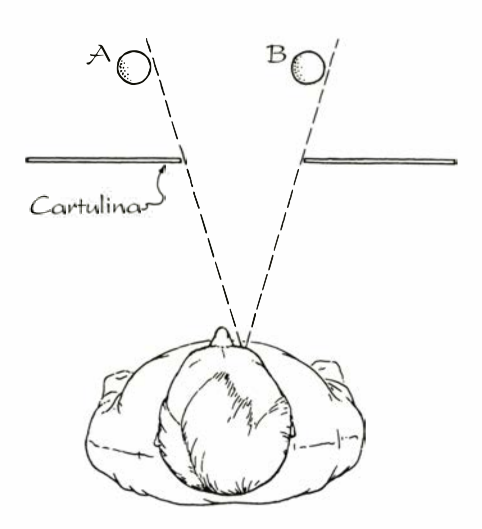
¿Por qué, en el efecto "Gato de Cheshire", un movimiento que cruce todo el campo visual de un ojo deja a veces sin borrar parte del campo visual del otro ojo? Lo que persiste es la parte que produce la imagen sobre la fóvea del ojo en el que parece tener lugar el borrado. Este se debe a un sistema de alarma que controla lo que se ve con el resto de la retina. Por esta misma causa, no hay borrado si el ojo sigue el movimiento del objeto. Como en tal caso el objeto produce permanentemente una imagen sobre la fóvea de ese ojo, no se dispara el sistema de alarma que induce el borrado de la visión del otro ojo.

El efecto rino-óptico fue bautizado con ese nombre por Alistair P. Mapp e Hiroshi Ono, de la Universidad inglesa de York. El nombre tiene que ver con los ojos de los rinocerontes: separados por un gran saliente craneal. Es un efecto que se pone de manifiesto con facilidad. Si el lector lleva gafas, quíteselas. Cierre el ojo izquierdo y fije la vista con el derecho en un objeto situado exactamente en frente. Luego, lentamente, lleve hacia adelante un dedo de la mano izquierda, moviendo ésta desde la oreja del mismo lado y cuidando de no mover el ojo derecho. En cuanto el dedo empiece a hacerse visible, lo detiene en esa posición. Sin girar la cabeza, rote el ojo derecho hacia el dedo con ánimo de mirarlo. Si el resalte del puente nasal del lector es lo bastante grande, el dedo desaparecerá tras el mismo. Si vuelve a girar el ojo hacia adelante, el dedo reaparecerá.

Una ocultación similar de un objeto visto directamente fue descrita, en 1844, por el investigador británico David Brewster, famoso por sus trabajos en óptica y visión. Para repetir sus experiencias, recórtese una abertura rectangular en una hoja de cartulina. Esta se mantendrá a varios centímetros por delante del ojo derecho, mientras se cierra el izquierdo. Otra persona colocará dos objetos estrechos a una distancia de varios centímetros de la cara opuesta de la cartulina. Mientras se mantiene la vista fija en el lado izquierdo de la abertura, el objeto *A* se colocará de modo que comience a asomar por ese lado de la abertura. El objeto *B* se colocará de modo que su costado derecho comience a ser tapado por el costado derecho de la abertura. Con los objetos así colocados, se verá *B* pero no *A*. Sin mover la cabeza, gírese la vista hacia el lado derecho de la abertura; aparecerá *A* y desaparecerá *B*. Si la vista vuelve a girarse hacia el lado izquierdo de la abertura, *A* desaparecerá y *B* reaparecerá.

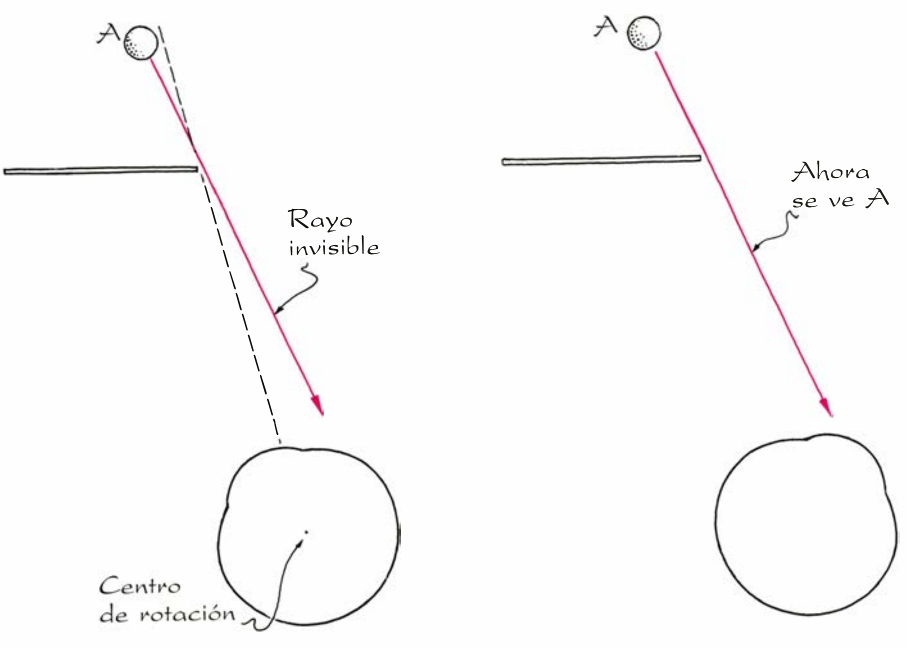
A este efecto, Brewster lo llamó paralaje óptico. En la comprobación del efecto rino-óptico, el puente de la nariz actúa a modo de lado izquierdo de la abertura y el dedo hace de objeto *A*. Para ver el dedo, hay que apartar la mirada del mismo. Ambos fenómenos dependen de un mismo hecho: la zona donde el ojo refracta los rayos luminosos (la córnea y el cristalino) está separada del punto central en torno al cual gira el ojo. Supongamos que toda la acción refractora del ojo pudiera representarse mediante un cristalino situado en la parte delantera de un ojo que fuese esférico. Entonces, cuando ese ojo mirase directamente *A*, ninguno de los rayos que partiesen de *A* llegaría al cristalino y, por ello, *A* no sería visible. Ello se debe a que el obstáculo (el puente de la nariz o el lado izquierdo de la abertura rectangular) impide el paso de los rayos que viajan hacia el ojo. Los demás rayos viajan en direcciones erráticas.

Cuando se gira el ojo hacia la derecha, en torno al punto central, de manera que se oriente hacia el frente, ese movimiento pone al cristalino en el camino de algunos de los rayos procedentes de *A* que bordean el obstáculo. Así, el cristalino refracta esos rayos sobre la retina y *A* se ve, dando una imagen reconocible, aunque borrosa.



6. Paralaje ocular

Mapp y Ono descubrieron que el efecto rino-óptico no se manifiesta en todas las personas. Con un puente nasal chato, como es el caso en los asiáticos orientales con los que hicieron pruebas, el observador ve el dedo mejor cuando rota el ojo para mirarlo directamente. El lector puede obtener un resultado similar mirando directamente al frente sólo con el ojo derecho (y con el ojo izquierdo cerrado), mientras mueve hacia adelante un dedo de la mano derecha, a partir de la oreja del mismo lado, hasta el punto en que el dedo comience a hacerse visible. Si entonces gira el ojo hacia el dedo, verá una mayor porción del mismo.



7. Efecto de la rotación del ojo

Libros

Moles, Historia Natural y aventuras matemáticas

Eugenio Portela, José Luis Pérez-Cirera y Carlos Sánchez del Río

Enrique Moles: la Vida y la Obra de un Químico Español, por A. Pérez-Vitoria (coord.). CSIC; Madrid, 1985. Después de una lenta tarea de recuperación iniciada a mediados del siglo pasado y con el impulso de las instituciones científicas creadas al comienzo del actual, la ciencia española del período de entreguerras alcanzó en muchas disciplinas un nivel notable dentro del concierto internacional que se vio frustrado una vez más, en esta ocasión por la sublevación militar de 1936 y su prolongada secuela. En esa breve etapa de esplendor, Enrique Moles es uno de los científicos españoles más destacados dentro de una generación de científicos destacados.

Reconocida la categoría señera de Enrique Moles, hay que apresurarse a decir que la obra que aquí comentamos es consecuencia directa del homenaje que le rindió el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, heredero de la Junta de Ampliación de Estudios, con motivo del centenario del nacimiento de Moles. Como tal homenaje la obra es heterogénea y desde luego su contenido no responde a las expectativas que su título pudiera despertar. Después de una lectura atenta, quien lo cerrare no podrá hacerse una idea cabal de "la vida y la obra" de Enrique Moles.

El primer capítulo, salido de la pluma de Augusto Pérez-Vitoria, lleva por título "Enrique Moles y el sistema periódico de los elementos". Se trata, como allí se manifiesta, de la adaptación de una conferencia y se resiente de ello. Es esta la única aproximación global a Moles que figura en la obra y por su reducida extensión es a la fuerza superficial y anecdótica, con clara tendencia a la hipérbole. Me limitaré a tres comentarios. En cuanto a la hipérbole: cuando se trata del sin duda importante IX Congreso Internacional de Química Pura y Aplicada, organizado por Moles en Madrid en 1934, se glosa que, por tratarse del primer congreso de esta serie celebrado después de la Guerra Europea, "marcó la reconciliación de los científicos y de los países que fueron enemigos"; sin duda se ha exagerado el alcance de aquel acontecimiento. En cuanto a la consideración de la historia de la ciencia: señala el autor que Moles mostró en esta actividad "cualidades sobresalientes... habituales de veteranos o jubilados"; quienes hemos elegido la historia de la ciencia como actividad profesional desde el principio queremos ver un lapsus en esta afirmación. Por último, una errata, negra pero singular: Moles fallecía "en la madrugada del 20 al 30 de marzo de 1953". En el haber de este capítulo hay que anotar las observaciones de primera mano del autor en torno a Moles y un ilustrador acercamiento cuantitativo a los temas que el biografiado cultivara. En resumen, este primer capítulo ofrece las aportaciones más interesantes de la obra al trazar una semblanza, aunque poco matizada, de Moles.

El segundo capítulo, presentado por José Elguero, ofrece las aportaciones orales que en el acto del homenaje efectuaron destacados científicos, tratando de glosar distintos aspectos de la actividad de Enrique Moles: Folch Jou trata las relaciones con la farmacia, Fernando Velasco de sus dotes de organizador, Vian Ortuño de su faceta de profesor, Sancho Gómez del investigador y Pérez-Vitoria trata de vincular la química de Moles con la poesía de Antonio Machado. En su conjunto, el capítulo adolece de los defectos de su origen, ya que los actos de esta índole no se caracterizan por su espíritu crítico, sistemático y riguroso. Antes bien, el tratamiento es el habitualmente consagrado a las grandes figuras. La propia subdivisión artificial de las distintas facetas hace caer en reiteraciones, dentro del tono panegírico y retórico. Las mismas anécdotas son relatadas de diversas formas y uno puede acabar preguntándose si Moles dejó de pintar ante la contemplación inalcanzable de Velázquez o Goya (pág. 47) o bien del Greco (pág. 56).

El tercer capítulo reproduce fundamentalmente una conferencia pronunciada por Moles en Roma en 1926, en la que resume sus investigaciones acerca de las densidades gaseosas. Se trata, por supuesto, del capítulo de mayor interés y del más auténtico homenaje. De interés secundario es el capítulo siguiente, en el que se reproduce la memoria de los hermanos Elhuyar en la que dan cuenta del descubrimiento del wolframio, acompañada de los comentarios de Moles, en los que junto a la agudeza de su comprensión de los fenómenos químicos cabe anotar alguna ingenuidad histórica. La obra se cierra con un último capítulo que recoge diversos testimonios sobre Moles, que poco aportan a la delimitación de su personalidad científica. Una lista de 264 trabajos de los que Moles fue autor ocupa las últimas páginas.

Por el momento, cabe afirmar que la biografía científica de Enrique Moles sigue esperando el tratamiento serio y profundo que merece. La aproximación de Moles Conde (1975) es de gran interés, pero por su planteamiento y desarrollo no agota el tema; desconozco si la tesis doctoral de Berrojo Jario (1980), de cuya publicación no tengo noticia, puede ser esa biografía que esperamos. Con todo, dada la penuria de aportaciones en estas materias, bienvenido sea este acercamiento a Enrique Moles. (E. P.)

Història Natural dels Països Catalans. Tomos 3, 4, 7. Edicions Enciclopèdia Catalana; Barcelona, 1984-1985. Ante nosotros, tres nuevos volúmenes de esta magna obra *Història Natural dels Països Catalans*, titulado el primero "Recursos geològics i sòl" (vol. 3), el segundo "Plantes inferiors" (vol. 4) y el tercero "Vegetació" (vol. 7). Los tres volúmenes, excelentemente presentados, ofrecen una amplia visión de sus temáticas respectivas, desarrollando sus contenidos de una forma clara, precisa y amena, que muestra el alto grado de conocimientos y profesionalidad del equipo de autores. El diseño de las maquetas, los caracteres tipográficos, el equilibrio entre fotografías, figuras y texto, así como la exposición de los contenidos y la terminología empleada, hacen de esta obra un ejemplo de cómo se puede describir de una forma atractiva, científica y asequible la naturaleza, no sólo para el aficionado y el gran público, sino también para todos los profesionales que se dedican a su estudio y enseñanza.

El volumen tercero está constituido

por dos aspectos temáticos bien diferenciados, "Recursos y riesgos geológicos" y "Suelos", realizados con aportaciones de varios autores y con la coordinación de David Serrat i Congost y Jaime Porta i Casanellas, respectivamente. La primera parte recoge los aspectos de mayor interés utilitario del patrimonio geológico de los Países Catalanes, comenzando con el análisis exhaustivo de los recursos hídricos, especialmente de las aguas subterráneas y los problemas que plantea su explotación, y pasando revista a los distintos tipos de yacimientos minerales, canteras de rocas industriales y recursos geoenergéticos: carbón, petróleo y posibilidades de utilización de la energía geotérmica. Tal como se describen estos recursos, con ayuda de abundante y clara información gráfica, representa una excelente panorámica de los conocimientos actuales sobre las posibilidades de su aprovechamiento, al tiempo que ofrece una interesante documentación para fines didácticos. Debe destacarse la precisión con que se realiza el análisis de los *riesgos geológicos*, tema que, por su relativa novedad, no suele tratarse con una adecuada línea argumental y que en este libro representa una de sus principales aportaciones.

En las casi doscientas páginas dedicadas a los *Suelos* se sintetiza la historia del desarrollo de la ciencia del suelo en los Países Catalanes hasta el momento actual, los datos referentes a los factores de formación, los procesos de evolución edafogenética, clasificación y uso del suelo en las diferentes áreas, junto con un auténtico texto de edafología básica que permite comprender, en su plena acepción, los términos y conceptos utilizados. Es notable la sencillez con que se recogen, en esquemas de fácil comprensión, algunas de las definiciones de las taxonomías modernas y la claridad con que se exponen los puntos centrales del conocimiento de la naturaleza y comportamiento dinámico del suelo. Esta parte del volumen cobra así una singular importancia, dada la escasez de libros de edafología que, recogiendo lo esencial de los conocimientos actuales de esta ciencia, presenten una panorámica completa de sus múltiples aplicaciones en diversos aspectos de la ordenación integral de un territorio.

El volumen cuarto está dirigido por Xavier Llimona y abre la serie de los dedicados a los seres vivos. Bajo la denominación de "plantes inferiors", se ocupa de ese amplio y poco conocido conjunto de organismos constituido por los Virus, Bacterias, Cianófitos, Algas, Musgos, Hepáticas y Helechos. De los cinco capítulos en que aparece dividido, se dedica el primero a generalidades, donde se discute sobre la organización procariótica y eucariótica (así como sobre los llamados "vegetales inferiores"), refiriéndose los otros cuatro al estudio más o menos detallado de los Procariotas, Algas, Briófitos y Helechos. En la estructuración general del texto referido a estos cuatro capítulos, la uniformidad de criterios seguidos en el desarrollo de los diferentes apartados permite la comparación instantánea de determinadas características entre muy diversos grupos de vegetales. La pauta descriptiva es, pues, la misma para todos los grupos tratados.

Comienza cada capítulo por una introducción en el conocimiento de un grupo vegetal, donde se exponen unas consideraciones generales sobre el tipo de organización que presentan, formas de reproducción, ciclos biológicos, peculiaridades fisiológicas, mecanismos adaptativos y requerimientos ecológicos, así como la sistemática que se va a emplear en su clasificación, únicamente fundamentada y razonada en el caso de los organismos procariotas. Figura, luego, un apartado sobre los aspectos históricos de los estudios realizados en los Países Catalanes, esbozándose una breve historia de las líneas de investigación y logros conseguidos por los más notables (y menos notables) naturalistas catalanes, así como el balance global de los conocimientos botánicos hasta la actualidad y las líneas de investigación en curso. Resulta paradójico que el investigador más prestigioso de las algas marinas de los países catalanes (Rodríguez y Femenías) figure en este apartado histórico con el nombre equivocado, así como también lo está la fecha de edición y presentación de su obra magna, como puede comprobarse en la fotografía de la página 110.

Finalmente, el resto y grueso de los capítulos lo constituye la parte descriptiva de los diferentes grupos vegetales, en que se detallan las peculiaridades morfológicas, anatómicas, reproductivas y ecológicas de los órdenes, familias, géneros y especies más característicos, así como los ambientes en que se desarrollan preferentemente, su distribución y comunidades significativas.

La parte dedicada a los Virus y Bacterias quizá resulte corta, en texto y aparato gráfico. Algo parecido sucede con los Cianófitos, parco en ilustraciones, aunque los tres grupos, abordados correctamente, presentan figuras de gran calidad; no obstante, la adición de una escala gráfica hubiera dado idea sobre el tamaño de muchos de los organismos representados.

El capítulo consagrado a las algas, muy documentado y completo, abunda en excelentes fotografías y dibujos, aunque se echa de menos algunas figuras que ilustren los conceptos básicos vertidos en la introducción, donde, por cierto, y una vez más en la literatura, quedan mal explicados y confusos los conceptos básicos de esporófito y gametófito. Las claves de determinación no son ni necesarias ni útiles en una obra de esta naturaleza (excepto para el que se inicia en la investigación de este grupo) al requerir el uso del microscopio y el manejo de muchos conceptos insuficientemente explicados y dibujados; más útil hubiera sido una clave de géneros de los Clorófitos, Feófitos y Rodófitos y suprimir algunas, como la de *Cytoseira*, no original y elaborada a partir de la del italiano Giaccone, género conflictivo para el especialista y aún para este último autor.

El mundo de los Briófitos se convierte en una revelación para el no especialista por la multiplicidad y variedad de formas que existen, magníficamente representadas con excelentes dibujos y esquemas generales cuidadosamente seleccionados. Los Helechos, por fin, se exponen de acuerdo con una sistemática correcta, aunque no razonada; reciben un tratamiento adecuado y claro con claves parciales en que, algunas, como las algas, requieren mayor y mejor ilustración gráfica. Es el caso de *Equisetum* y *Filicales*, donde una sección transversal del tallo del primero y una figura más clara de los tipos de soros de los últimos ayudarían a comprender su estructura y clasificación. La bibliografía que figura al final, aunque pertinente y útil, es sumaria, sobre todo la dedicada al capítulo de las algas, de selección un tanto arbitraria.

Finaliza la obra con unos anexos en que figuran los catálogos de cianofíceas, algas, briófitos y pteridófitos de los Países Catalanes hasta 1985, un índice terminológico muy útil, que al mismo tiempo sirve de glosario y un índice temático donde, por cierto, no figuran los autores de cada capítulo, aunque se afirme lo contrario al principio del volumen.

Un catálogo florístico, aunque innecesario en este tipo de publicaciones, puede resultar muy útil a los especialistas si es riguroso y está confeccionado con cuidado. En el presente caso se observan incoherencias, con relativa

frecuencia, entre el texto y el catálogo. La grafía de determinados taxones es incorrecta unas veces en el texto y otras en el catálogo. Especies que figuran como independientes en el texto aparecen sinónimas en el catálogo, y a veces bajo otro epíteto específico, llegándose a incluir la misma especie en familias o en órdenes diferentes. Así, *Prorocentrum marinus* pasa a ser *P. lima, Scenedesmus bijugatus* es *S. ecornis, Dinophysis caudata* y *D. tripos* pasan a *D. caudata, Pleuromastix* pasa de *Cryptomonadales* a *Tetragonidiales, Cladophoropsis* pasa de *Boodleaceae* a *Cladophoraceae*, etc. Ya un poco más grave (científicamente) es sinonimizar *Corallina elongata* con *C. officinalis* y, sobre todo, incluir los géneros *Taonia, Spatoglossum* y *Zonaria* en la familia *Phyllariaceae*.

Abundando un poco más en el tema, de la lectura del texto por parte de un no especialista se comprueba la ausencia en el catálogo de taxones, a veces, importantes. No figuran, por ejemplo, *Phacus agilis* (Euglenófitos), *Arthrodesmus trispinatus, Zygnema sterile, Chara braunii, C. major, Nitella capillaris, Tolypella hispanica* en las Clorofíceas, *Cystoseira dubia, C. spinosa* var. *squarrosa, C. platyclada* en las Feofíceas y *Chroodactylon smaragdinum, Batrachospermum densum, Lithophyllum incrustans* y *L. lobatum* en las Rodofíceas. Entre plantas de organización superior, faltan *Sphagnum subbicolor, S. quinquefarium, S. molle, Brachytecium populeum* en los Briófitos; se omite *Phillitis scolopendrium, P. sagittata, Ceterach officinarum* y *Asplenium adiantum-nigrum*, en los Pteridófitos. Después de lo anteriormente expuesto, la relación de plantas inferiores de los Países Catalanes queda, no como un catálogo exhaustivo, sino como una buena base para una primera aproximación al catálogo, suponiendo que esté respaldado por los correspondientes testimonios de herbario.

El volumen da la impresión de haber sido editado con cierta precipitación y de no haber sido revisadas con cuidado y corregidas algunas de las pruebas de imprenta por parte de los autores correspondientes y por los especialistas que han "releído críticamente" el manuscrito. ¿Podría haberse sacado una fe de erratas? Ello podría haber permitido además corregir el pie de algunas figuras, como las de las págs. 68, 290 y 294 por ejemplo; y haber rehecho alguna otra: las de las págs. 16 (en que figura mal la escala del tiempo), 69 (letra c) y, sobre todo, la de la pág. 234 (ciclo vital de *Cystoseira*), donde aparece en el dibujo b_2 un oogonio con 8 oosferas, cuando todo especialista sabe que en la familia *Cystoseiraceae* sólo hay una oosfera por oogonio excepto en el género surafricano *Bifurcariopsis*.

A pesar de estos errores, la enorme cantidad de información, su rigor y actualización en la mayoría de los casos, la calidad y cantidad de figuras y fotografías, así como la cuidadosísima presentación, hacen de este volumen la obra más completa y mejor realizada de las editadas hasta ahora, en su género, en España.

Vayamos al volumen séptimo: "Vegetació", dirigido por R. Folch y Teresa Franquesa. Si antiguamente, en las obras de este tipo, se presentaba la vegetación de un territorio determinado desde un punto de vista puramente paisajístico y a veces casi turístico, en esta ocasión se le ha dado al término una moderna dimensión conceptual. La consideración de la vegetación como el conjunto de sistemas biológicos resultantes de la agrupación e interacción de las plantas que los generan y la síntesis final en grandes unidades paisajísticas de todas las comunidades analizadas nos muestran aquí los aspectos fundamentales del paisaje vegetal. En consecuencia con esto, el texto se presenta dividido en dos partes fundamentales: unidades de vegetación y paisaje vegetal, precedidas por un capítulo de generalidades.

En la primera parte, "Generalidades", a la que se dedican 49 páginas, se hace una amplia exposición sobre las comunidades vegetales en general, así como sobre los dominios bioclimáticos y su relación con el manto vegetal. El concepto de comunidad vegetal está definido de forma flexible, pero precisa, en todas las circunstancias que contribuyen a su génesis, establecimiento y evolución, suministrando los dibujos esquematizados una clara información sobre la marcha teórica de los procesos de sucesión, degradación y reconstitución de tipos determinados de vegetación. El concepto de clímax, así como los tipos de vegetación y formaciones vegetales, quedan igualmente bien definidos, ayudados por esquemas que muestran su tipología fisiognómica. Cabe destacar la excelente síntesis sobre la historia del conocimiento de la vegetación desde el siglo XVI hasta llegar a los estudios fitosociológicos modernos, en que se comentan los cuerpos doctrinales y metodologías que inspiraron las tradiciones y escuelas de mayor influencia en los estudios fitocenológicos. Por el contrario, un apartado anterior dedicado a la deno-

minación y sistemática de las comunidades vegetales resulta muy incompleto e impreciso al tratar únicamente de la forma de designarlas y no ofrecer una exposición conceptual y una caracterización de las categorías sintaxonómicas que clasifican y jerarquizan dichas comunidades.

El capítulo sobre los dominios bioclimáticos y el manto vegetal con que finaliza esta primera parte constituye, igualmente, un buen y detallado ensayo sintético, que permite al lector medio comprender cómo se pueden agrupar las unidades elementales de vegetación en grandes conjuntos fisiognómicos y obtener así una panorámica de los grandes dominios de vegetación que configuran el manto.

La parte dedicada a las unidades de vegetación presenta una concepción de carácter biogeográfico que prefigura la localización en el espacio de cada unidad de vegetación; de esta manera, todas las unidades aparecen como conjuntos coherentes susceptibles de ser identificados en el paisaje. Se describen aquí las diferentes regiones biogeográficas que afectan a las tierras de habla catalana, así como las unidades de vegetación zonal y azonales con tipos de vegetación ligados a ambientes edáficos especiales. La descripción de los diversos tipos de comunidades, previas unas consideraciones generales sobre los bioclimas, hábitat y características de la vegetación, se efectúa de forma documentada ofreciendo abundantes datos sobre fisiognomía, distribución altitudinal y geográfica, especies características, etc. La documentación gráfica que acompaña estas descripciones, sobre todo fotografías, es abundante, bien seleccionada y de buena calidad en general (algunas excelentes), aunque en ciertos casos, más que la comunidad aparece representada su especie más característica. La inclusión en este apartado de algún mapa de Europa y norte de Africa en que apareciesen las regiones biogeográficas y los apelativos geográficos que luego se nombran en el texto hubiera permitido al lector medio apreciar mejor la situación de los países catalanes en el contexto general y situar con rapidez las vías de penetración y áreas de distribución de los diferentes elementos corológicos.

La última parte del volumen, dedicada a las grandes unidades paisajísticas, sigue un esquema descriptivo uniforme mediante el que se aportan los datos fisiográficos, bioclimáticos y fitosociológicos más significativos, así como otros sobre la vegetación actual resultante de la incidencia del hombre sobre los grandes dominios de vegetación. Termina la descripción de cada unidad paisajística con la explicación de un recorrido representativo y accesible al público (ya que siempre se desarrolla a lo largo de carreteras de la red viaria principal), en que destacan los tramos característicos de cada unidad de paisaje, complementado con una magnífica interpretación esquemática. Como final de la vegetación se adjunta una bibliografía, cualitativa y cuantitativamente consecuente con lo expuesto en la obra, aunque de matiz casi exclusivamente localista.

Como complemento y resumen de lo tratado, una exhaustiva y utilísima tabla sistemática de unidades de vegetación nos relaciona, de forma ordenada y jerarquizada de acuerdo con el sistema sigmatista, las más de 500 comunidades que, hasta el año 1984, han sido identificadas en los Países Catalanes. El hecho de que al lado de cada unidad de vegetación figure su denominación vulgar podría quizás haber servido de criterio básico para la confección de una clave de determinación, por lo menos de las comunidades más significativas que, como se ha demostrado en otros trabajos sobre vegetación, hubiera sido de gran utilidad al aficionado. Un índice de terminología vulgar y otro de denominaciones científicas cierran este volumen.

La obra resulta, pues, un excelente compendio en que la interesante y adecuada parte introductoria va conduciendo de forma segura y gradual hacia el conocimiento y la comprensión, en conjunto y de cada una de sus partes, de la vegetación y el paisaje de las tierras catalanas.

Estos tres volúmenes de historia natural, de atractiva e impecable presentación, representan un gran esfuerzo de investigación, recopilación y actualización de conocimientos por parte de un equipo de autores entusiasta de la naturaleza y de su tierra. El interés e importancia de la obra hubiera merecido por lo menos una edición en castellano que hiciera más asequible al gran público el conocimiento de esta parte del patrimonio de España; no obstante, su redacción en lengua catalana no supondrá nunca una barrera insalvable para el verdadero curioso de la naturaleza. (J. L. P.-C.)

AVENTURAS MATEMÁTICAS, por Miguel de Guzmán. Editorial Labor; Barcelona, 1986. Acaba de publicarse un nuevo libro de Miguel de Guzmán destinado a promover el interés por la matemática entre las generaciones jóvenes. Conviene destacar en primer lugar el hecho ejemplar de que uno de nuestros matemáticos más distinguidos no desdeñe emplear una parte de su tiempo en tan noble tarea; ahora, que tanto se habla de desarrollar la investigación científica, es más importante que nunca descubrir los talentos especiales que requiere cada disciplina y que existen profusamente entre nosotros, aunque frecuentemente no sepamos aprovecharlos.

En cuanto al libro, tiene, en mi opinión, la orientación adecuada para conseguir el objetivo propuesto. Es un libro interactivo, en el que continuamente se invita al lector a que se detenga a pensar, a que trate de resolver los problemas por sí mismo, a que analice posibles alternativas y, lo que es más importante, a que no se desanime en el empeño.

Se ofrecen al estudiante los métodos ya usados por los grandes matemáticos de todos los tiempos y se muestra con numerosos ejemplos la fertilidad de ideas muy simples. Se resalta el aspecto lúdico de la matemática, el ensayo y error, y la necesidad de interrumpir a veces para dejar que actúe el subconsciente. Con ello se pone de relieve la manera cómo trabajan realmente los matemáticos de oficio creadores: relajadamente, divertidamente. Para decirlo de manera concisa: el libro de Guzmán es la antítesis de nuestros textos secos, aburridos, rigoristas y... muertos. También puede expresarse de otro modo: es la matemática viva y siempre naciente frente al cadáver embalsamado, eso sí, muy cuidadosamente embalsamado, de la matemática que fue.

Podría pensarse, después de lo que llevo escrito, que estoy refiriéndome a un libro frívolo. Nada más lejos de la realidad. Burla burlando, se muestran los métodos más fecundos de la matemática y se tratan o insinúan problemas de gran profundidad que en los estudios formales sólo se consideran en cursos avanzados. Hay un notable equilibrio entre cuestiones antiguas y modernas y abundantes ejemplos de problemas cuyo enunciado es fácil de entender por cualquiera y... que están pendientes de resolución desde hace siglos. Tiene además el libro unas notas históricas que muestran el aspecto humano de algunos grandes matemáticos y que contribuyen a dar vida a la obra.

En resumen, un libro divertido y profundo para que algunos jóvenes puedan descubrir que la matemática es su vocación. (C. S. R.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

INHIBICION DE LA FOTOSINTESIS POR HERBICIDAS

MODE OF ACTION OF HERBICIDES IN PHOTOSYNTHESIS. Dirigido por J. J. S. van Rensen, A. Trebst y P. Böger en *Zeitschrift für Naturforschung C* (edición especial de la Reunión Internacional sobre Herbicidas, Wageningen, Holanda, 1983), vol. 39; 1984.

THE 32000 THE DALTON-Q_B PROTEIN OF PHOTOSYSTEM II. D. J. Kyle en *Photochemistry and Photobiology*, vol. 41, págs. 107-116; 1985.

HERBICIDE INTERACTION WITH PHOTOSYSTEM II. RECENT DEVELOPMENTS. G. Renger en *Physiologie Végétale*, vol. 24, págs. 509-521, 1986.

IN VITRO AND IN VIVO ANALYSES OF THE MECHANISM OF ACTION OF SWEP. M. Barón, A. Chueca y J. López Gorgé, en *Pesticide Biochemistry and Physiology*, vol. 26, págs. 343-352; 1986.

THE TOPOLOGY AND THE PLASTOQUINONE AND HERBICIDE BINDING PEPTIDES OF PHOTOSYSTEM II IN THE THYLAKOID MEMBRANE. A. Trebest en *Zeitschrift für Naturforschung C*, vol. 41, págs. 240-245; 1986.

SINTESIS COSMICA DE LITIO, BERILIO Y BORO

ASTROPHYSICAL PRODUCTION RATES FOR LI, BE, AND B ISOTOPES FROM ENERGETIC ^{1}H AND ^{4}HE REACTIONS WITH HECNO NUCLEI. T. P. Walker, G. J. Mathews y V. E. Viola en *The Astrophysical Journal*, vol. 299, 1.ª parte, n.º 2, págs. 745-751; 15 de diciembre de 1985.

NUCLEOSYNTHESIS AND ITS IMPLICATIONS ON NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS. Dirigido por Jean Audouze y Nicole Mathieu. D. Reidel Publishing Co., 1986.

SINAPSIS QUE COMPUTAN EL MOVIMIENTO

THE MECHANISM OF DIRECTIONALLY SELECTIVE UNITS IN THE RABBIT'S RETINA. H. B. Barlow y W. R. Levick en *The Journal of Physiology*, vol. 178, n.º 3, págs. 477-504; junio, 1965.

A SYNAPTIC MECHANISM POSSIBLY UNDERLYING DIRECTIONAL SELECTIVITY TO MOTION. V. Torre y T. Poggio en *Proceedings of the Royal Society of London: B*, vol. 202, n.º 1148, págs. 409-416; 26 de julio de 1978.

THEORETICAL APPROACHES TO NEUROBIOLOGY. Dirigido por Werner E. Reichardt y Tomaso Poggio. The MIT Press, 1980.

MODELOS CLIMATICOS

MILANKOVITCH AND CLIMATE. Dirigido por A. L. Berger, J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla y B. Saltzman. D. Reidel Publishing Co., 1984.

AN INTRODUCTION TO THREE-DIMENSIONAL CLIMATE MODELING. Warren M. Washington y Claire L. Parkinson. University Science Books, 1986.

THE NUCLEAR WINTER DEBATE: COMMENT AND CORRESPONDENCE. Starley L. Thompson y Stephen H. Schneider en *Foreign Affairs*, vol.65, n.º 1, págs. 171-178; otoño, 1986.

GLUCOSA Y ENVEJECIMIENTO

MODIFICATION OF DNA BY REDUCING SUGARS: A POSSIBLE MECHANISM FOR NUCLEIC ACID AGING AND AGE-RELATED DYSFUNCTION IN GENE EXPRESSION. Richard Bucala, Peter Model y Anthony Cerami en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 81, n.º 1, págs. 105-109; enero, 1984.

HIGH-AFFINITY RECEPTOR-MEDIATED UPTAKE AND DEGRADATION OF GLUCOSE-MODIFIED PROTEINS: A POTENTIAL MECHANISM FOR THE REMOVAL OF SENESCENT MACROMOLECULES. Helen Vlassara, Micahel Brownlee y Anthony Cerami en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 82, n.º 17, págs. 5588-5592; septiembre, 1985.

AMINOGUANIDINE PREVENTS DIABETES-INDUCED ARTERIAL WALL PROTEIN CROSS-LINKING. M. Brownlee, H. Vlassara, A. Kooney, P. Ulrich y A. Cerami en *Science*, vol. 232, n.º 4758, págs. 1629-1632; 27 de junio de 1986.

LA REAPARICION DE FASES

LATTICE THEORY OF BINARY FLUID MIXTURES: PHASE DIAGRAMS WITH UPPER AND LOWER CRITICAL POINTS FROM A RENORMALIZATION GROUP CALCULATION. James S. Walker y Chester A. Vause en *The Journal of Chemical Physics*, vol. 79, n.º 6, págs. 2660-2676; 15 de septiembre de 1983.

CRITICAL BEHAVIOR NEAR A VANISHING MISCIBILITY GAP. Roger G. Johnston, Noel A. Clark, Pierre Wiltzius y David S. Cannell en *Physical Review Letters*, vol. 54, n.º 1, págs. 49-52; 7 de enero de 1985.

SHEAR-VISCOSITY BEHAVOIR NEAR THE DOUBLE CRITICAL POINT OF THE MIXTURE 3-METHYLPYRIDINE, WATER, AND HEAVY WATER. G. A. Larsen y C. M. Sorensen en *Physical Review Letters*, vol. 54, n.º 4, págs. 343-345; 28 de enero de 1985.

DETONATION DE EXPLOSIVOS

DETONATION. Wildon Fickett y William C. Davis. University of California Press, 1979.

NUMERAL MODELING OF DETONATIONS. Charles L. Mader. University of California Press, 1979.

STEADY-STATE TWO-DIMENSIONAL DETONATION. J. B. Bdzil en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 108, págs. 195-226; julio, 1981.

INTRODUCTION TO DETONATION THEORY. Wildon Fickett. University of California Press, 1986.

SIMBIOSIS EN LAS PROFUNDIDADES MARINAS

GEOMICROBIOLOGY OF DEEP-SEA HYDROTHERMAL VENTS. Holger W. Janasch y Michael J. Mottl en *Science*, vol. 229, n.º 5715, págs. 717-725; 23 de agosto de 1985.

HYDROTHERMAL VENTS OF THE EASTERN PACIFIC: AN OVERVIEW. Número especial del *Bulletin of the Biological Society of Washington*, dirigido por Meredith L. Jones, n.º 6; diciembre, 1985.

JUEGOS DE ORDENADOR

A RANDOM WALK DOWN WALL STREET. Burton G. Malkiel. W. W. Norton & Company, 1985.

TALLER Y LABORATORIO

THE CHESHIRE CAT EFFECT. Sally Duensing y Bob Miller en *Perception*, vol. 8, n.º 3, págs. 269-273; 1979.